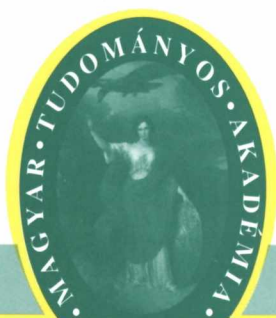


TUDOMÁNYPOLITIKA MAGYARORSZÁGON
II. A DISZCIPLÍNÁK MŰVELÉSE

HORVÁTH ZALÁN
–NAGY KÁROLY
–TOMPA KÁLMÁN

FIZIKA



1825

MAGYARORSZÁG AZ EZREDFORDULÓN



TUDOMÁNPOLITIKA MAGYARORSZÁGON
I-II-III.

- I. Tudománypolitika válaszúton
- II. A diszciplínák művelése
- III. Magyarországi kutatóhelyek

Programvezető és szerkesztő
Glatz Ferenc

Olvasószerkesztő
Balogh Margit, Pótó János

TUDOMÁNYPOLITIKA MAGYARORSZÁGON
II. A diszciplínák művelése

HORVÁTH ZALÁN–NAGY KÁROLY–TOMPA KÁLMÁN

Fizika

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
BUDAPEST • 2001

Szerkesztő
GLATZ FERENC

Olvasószerkesztő
Balogh Margit

ISBN 963 508 277 0 Ö
ISBN 963 508 326 2
ISSN 1587-2408

Kiadja
a Magyar Tudományos Akadémia
A kiadásért felel: Glatz Ferenc, az MTA elnöke
Nyomdai előkészítés:
az MTA Történettudományi Intézetének kiadványcsoportja
Vezető: Kovács Éva
Borító: Horváth Imre
Tördelés: Csányi Attila
Nyomdai munkák: Áldási és Németh Nyomda Bt.
Felelős vezető: Áldási Pálné
Megjelent 3,4 (A/5) ív terjedelemben, 1500 példányban

Pillantás a világra a hazai helyzet bemutatásával

A fizika célja az anyagi világ alapvető törvényszerűségeinek és szerkezetének a megismerése.* Kutatási módszere messzemenően jellemző erre a tudományra. Ez annak következménye, hogy eleinte hosszú ideig az élettelen anyag sajátosságait tanulmányozta. Az ezen elvégzett méréseket meg lehet ismételni és ezáltal a jelenségek hosszabb ideig vizsgálhatók lényegében ugyanolyan feltételek mellett. A fizikai ismeretalkotás alapvető lépései: a jelenség felismerése, mérhető mennyiségekkel jellemzett fogalmak alkotása, megismételhető mérésekkel való vizsgálata, a kapott adatok alapján az eredmények számszerűsítése, majd a jelenséget leíró, matematikailag megfogalmazott elmélet megalkotása. Az így kapott elméletnek általában messzemenő következményei vannak, és akkor tekinthető megalapozottnak, ha a belőle levont összes következtetést a további kísérletek igazolják. Ilyen módon az elmélet és a kísérletek kezdeti finom hálóját a vizsgálatok folyamatában csodálatosan szilárd, megrendíthetetlen épületté válik.

Fontos feladat a törvényszerűségek ellenőrzése szélsőséges körülmények között (pl. egyre nagyobb energián, egyre kisebb távolságon). Megtörténhet ugyanis, hogy ezek a kísérletek az elmélet módosításának szükségességéhez vezetnek. Ezért a fizikai törvények fontos kiegészítője érvényességi körüknek a megadása. Ez a 20. század fizikájának egy alapvető felismerése. Az atomi világ

* A fizika helyzetének századvégi bemutatását a Fizikai Tudományok Osztályához tartozó tudományos bizottságok elemző írásos jelentéseinek alapján készítettük. Ezeket a helyzetelemzéseket mindegyik bizottság megtárgyalta és a vita alapján készített összegeзések kerültek az osztályülések elé. Itt is vita volt róluk, és ezután készültek el a háttéranyagként szereplő bizottsági jelentések. A következő megállapítások tehát csak részben fejezik ki a tanulmány szerzőinek egyéni álláspontját. Egyes szövegrészeket teljes egészében átvettünk a bizottsági jelentésekből. A tanulmány elkészítése mégsem egyszerű összegeзése a bizottsági anyagoknak, mert a korlátozott keret miatt jelentős rövidítésekre kényszerültünk. Ennek során a válogatás és a hangsúlyok kitétele mindenképpen szubjektív, a szerzők véleményét tükrözi a fizika századvégi helyzetéről. A fizika ma olyan gazdag tudomány a témaköröket és eredményeket tekintve, hogy minden hasonló vállalkozás csak szegényes lehet a valódi képhez képest.

szintjén például a klasszikus mechanika helyett a kvantummechanikát, a vákuumbeli fénysebességhez közeli sebességek esetén a speciális relativitáselméletet kell alkalmazni. Az új törvényszerűségek nem érvénytelenítik a korábbiakat, csak korlátozzák azok alkalmazhatósági körét.

Galilei szerint a természet a matematika nyelvén szólal meg, ebből következik, hogy a fizikus számára a matematikai leírás eszköz a természet vallatására. A fizikai elméletek sokszor megtermékenyítően hatnak a matematikára, a használt új matematikai fogalmak és eszközök precízebb megalapozására ösztönözve azt. Az elméletből levezethető eredmények akkor hasznosak, ha összevethetők a kísérletekkel. A fizikai elméletek ellenőrzésére és igazolására szolgáló mérések adják ezen kutatás egyik fontos eszközét. A kidolgozott mérési módszerek és eredmények legtöbbször hasznossá válnak a többi tudomány és a technika számára. Maguknak az egyre bonyolultabb kísérleteknek megvalósítása pedig csúcstechnológiát igényel. Így a fizikai kutatások a technikai fejlődés egyik fő hajtóerejét adják.

A minket körülvevő anyagi világ makroszkopikus teste hatalmas számú elemi összetevőből (molekulákból, atomokból, elemi részecskékből) állnak. Ezek viselkedésének egzakt matematikai leírása lehetetlen, de értelmetlen is, mivel nincs olyan mérés, amely az egyes részecskék egyedi viselkedését külön-külön meghatározná. Ezért a fizika eredményes művelésének további fontos eszköze olyan egyszerűsítő leírás, modell megalkotása, amely egyrészt tükrözi az alapvető törvényeket, másrészt csak azokra a lényeges jellemzőkre koncentrál, amelyek mérésekkel ellenőrizhetők. Ma már – az anyag szerkezetének részletes ismeretében – az anyag dinamikájára a múlt században megalkotott elméleti leírásokat (termodinamika, hidrodinamika, rugalmasságtan, anyagok elektrodinamikája) ilyen egyszerű fenomenológiai modelleknek látjuk.

Ez a lényegre koncentráló, egyszerűsítő modelleket használó fenomenológiai tárgyalásmód a fizikusok olyan eszköze, amely más tudományterületeken is eredményes, együttműködő partnerré teheti őket.

A szigorú következetességgel végzett mérések és ezek állandó összevetése a matematikai modellekkel olyan módszer, mely diadalra vitte a 20. század fizikáját. Ez a *fizikai gondolkodás* forradalmasította a többi természettudományt és a technikát. Többek között megteremtette a modern informatika fizikai alapjait. Ennek visszahatásaként új lehetőségek jelentek meg. A nagy teljesítményű számítógépes háttérkapacitás egyrészt a korábbi analitikus modellek mellett lehetővé teszi a folyamatok számítógépes modellezését, másrészt módot nyújt egyre bonyolultabb eredmények *ab initio* számítására is. Az egyre bonyolultabb feladatok egyre nagyobb teljesítményű számítógép-rendszereket és programozási technikákat igényelnek, így alakul ki dinamikus kölcsönhatás a fizika és az új fiatal tudomány, az informatika között.

A fizikai kutatások átfelnek az anyag elemi összetevőinek vizsgálatától az univerzum viselkedésének leírásáig. Ezért a fizika alfejezetei is részben a vizsgálat tárgyai szerint alakultak ki: részecskefizika, magfizika, atom- és molekulafizika, optika (lézerfizika), szilárdtestfizika, csillagászat és űrfizika. Fontosak ezen túl az interdiszciplináris kutatások: biológiai fizika, valamint az alkalmazott kutatások: sugárvédelem, környezetfizika, reaktorfizika.

Mint már fentebb említettük, a nagyszámú azonos részecskét vagy összetevőt tartalmazó rendszerek vizsgálata speciális módszereket kíván, ezek a módszerek alkalmazhatók a fizika korábban megemlített bármely területén, sőt más tudományterületeken is. Az ilyen vizsgálatok a statisztikus fizika témakörébe tartoznak. Ezek a pillanatnyilag legfontosabb aldiszciplínák.

A 20. század végéhez közeledve megállapíthatjuk, hogy ez a század a fizika területén nagyszerű tudományos eredményekkel és felfedezésekkel, valamint azok műszaki és orvosi alkalmazásával gazdagította az emberiséget. Meghatározó szerepe volt nemcsak a világról alkotott képünk formálásában, hanem más diszciplínák megtermékenyítésével az emberek életének szebbé, boldogabbá tételében is. Elég itt arra utalni, hogy a rádió, a televízió, az elektronika, a számítógépek teljesen megváltoztatták az emberek életformáját. Tulajdonképpen a fizikai felfedezéseknek köszönhető az is, hogy a világ dolgairól (bárhol történjenek is azok) azonnal értesülünk.

Éppen a 20. század hajnalán, 1900 decemberében tartotta Planck azt az előadását, amelyben beszámolt arról, hogy a hőmérsékleti sugárzás energiájának frekvencia szerinti eloszlását a kvantumhipotézis bevezetésével sikerült a tapasztalattal egyezően megmagyaráznia. Ez volt az első lépés a 20. század fizikájának máig ívelő diadalútján. Ezt követte Einstein fotonhipotézise, majd Bohr, Heisenberg, Schrödinger és Dirac munkája révén megszületett a század egyik legragyogóbb fizikai elmélete, a *kvantummechanika*. Hatását tekintve példátlan a tudományos elméletek között, mert ez magyarázza meg az atomok fizikáját, azok egymáshoz kapcsolódását, a molekulák törvényszerűségeit és végső soron az anyag szerkezetét, a különféle halmazállapotok mibenlétét. Ennek folytán lett a kvantummechanika a kémia, a biológia és más élő tudományok egyik alapja. De ugyanez igaz az elektronikára és a számítástechnikára is, mert ezeknek is a kvantummechanika teremtette meg a fizikai alapját a félvezetőkre vonatkozó ismeretekkel.

A 20. század másik nagy hatású fizikai elmélete az Einstein által megalkotott *relativitáselmélet*. A térre, időre és energiára vonatkozó fizikai fogalmak teljesen új értelmezést nyertek a newtoni klasszikus fizikai képhez viszonyítva. Az általános relativitáselmélet tudományos alapját adja a világegyetem keletkezésére és időbeli fejlődésére vonatkozó kutatásoknak. Nagyszerű lehetőség adódott a nagy

energiájú gyorsítók megépítésével arra, hogy néhány év múlva kísérletileg elő lehet állítani az anyagnak olyan állapotát, amelyen az univerzum keletkezésekor lehetett.

A 20. század fizikája alapján jutott a kutatás ma oda, hogy egyrészt a világ-egyetem törvényszerűségeit, másrészt az egészen kis elemi objektumok viselkedését, egymáshoz kapcsolódását, a közöttük ható erőket és fizikai tereket vizsgálni tudjuk.

Érdemes visszagondolni a száz év előtti helyzetre, amikor Planck tanára, Jolly a fiatal Plancknak azt tanácsolta, hogy nem érdemes fizikára adni a fejét, mert a fizika épülete szinte teljesen készen van, oly tökéletes, hogy azon már nem sok tennivaló akad a jövőben. Nagyot tévedett, mert a fejlődés olyan nagyszerű tudományos eredményeket hozott, amelyek a 20. századot magasan kiemelik a megelőzők közül.

Részecskefizika

A helyzet áttekintését és ismertetését az ún. *részecskefizikai* kutatásokkal kezdjük. Ezek ugyanis azok a vizsgálatok, amelyek természetes folytatásai a fizika fő fejlődési vonulatának. Ez Galilei és Newton mechanikai és gravitációs kutatásaival kezdődött, Maxwell elektrodinamikájával folytatódott, és a 20. század első évtizedeiben a relativitáselmélettel és a kvantummechanikával, illetve e kettő egyesítéséből született relativisztikus kvantum-térelméletekkel napjaink legsikeresebb fizikai elméletét jelenti. A részecskefizika végső soron azt kutatja, hogy *milyen az anyagi világ szerkezete a legkisebb elérhető méretek tartományában*. A mai állásfoglalás az, hogy az anyag elemi részekből épül fel a közöttük ható különféle erők kölcsönhatása révén. Azt vizsgálják, hogy milyen részecskék fordulnak elő és milyen sajátosságú erők hatnak közöttük.

Ezek egy részében gyorsító berendezésekkel nagyon nagy energiára felgyorsított részecskéket ütköztetnek egymással, és különféle észlelő eszközökkel detektálják az ütközés utáni állapotot. Ebből következtetnek az ütköző részek közötti kölcsönhatás sajátosságaira, megerősítve vagy megcáfolva a létező elméleti modell jóslatait. Így megy előre ez a kutatás, miáltal sok új részecskét sikerült eddig előállítani és tisztázni a közöttük ható kölcsönhatások alapvető tulajdonságait. (Csak példaként említjük meg, hogy az elektromágneses kölcsönhatásra vonatkozó elméletet, az ún. kvantum-elektrodinamikát a 13. tizedesjegyig igazolták a kísérletek.)

A jelenlegi helyzet a részecskefizika területén a következőképpen jellemezhető. A ma ismert elmélet, az ún. standard modell az összes létező kísérletet nagy pontossággal leírja, de mégis úgy gondoljuk, hogy ez a modell nem az utolsó szó, hanem egy ún. fenomenológiai leírás, amely alacsonyabb energiákon tökéletes, de magasabb energiákon pontosabb elméletre van szükség.

Több olyan körülmény van ugyanis, amelyre az elmélet nem ad választ. Ilyen például, hogy miért három részecskecsalád létezik? Mi az oka annak, hogy az elektronnak van két nehezebb társa (nüon és tau)? Vagy alapvető elméleti kérdés a részecskék tömegének a keltése. Nincs még kísérlettel igazolva a tömegkeltésben szerepet játszó hipotetikus részecskének, a Higgs-mezonnak a létezése. Ezek mind izgalmas, elvi fontosságú kérdések, és szorosan összefüggnek az ember ama kíváncsiságával, hogy milyen is az a világ, amelynek részei vagyunk, hogyan keletkezett (ha egyáltalán keletkezett?), és miként, milyen törvények szerint fejlődik. Ezek több tízezer éve foglalkoztatják az emberiség egy részét. Az évezredek során a kultúra állapotától függően a tudósok, filozófusok, költők más-más válaszokat adtak e kérdésekre. A 20. század végén úgy tűnik, hogy a részecskefizika jutott legközelebb az e kérdésekre adható igaz válaszokhoz. Ha visszagondolunk a száz évvel ezelőtti helyzetre, azt tapasztaljuk, hogy a világról alkotott képünk igen nagyot változott. A kb. 15 milliárd évvel ezelőtt történt ősrobbanásnak számos jelét ismerte fel a tudomány, de a legalapvetőbb kérdések még válaszra várnak. Sőt, talán még fel sem tette a tudomány ezeket.

A fizika szemszögéből nézve ezek ma az izgalmas kérdések. Az egyik gond azonban az, hogy a kísérleti kutatás e téren igen költséges, dollármilliárdok kellemenek hozzá. Még a leggazdagabb országok sem adnak egyedül ennyi pénzt erre. Csak nemzetközi együttműködésben végezhetők ma az ilyen kutatások.

Az intellektuális hasznon túl társadalmi, illetve gazdasági haszna is van ezeknek a kutatásoknak, mert szinte melléktermékként olyan új technológiai újítások, eljárások, anyagok keletkeznek, amelyek az élet számos más területén is felhasználhatóak és végeredményben gazdasági haszonnal járnak.

Hazánkban a részecskefizikai kutatásoknak szép és nemzetközi elismertséggel büszkélkedő hagyományai vannak. Az elméleti fizikai kutatások a két háború közötti időre nyúlnak vissza. Novobátsky Károly középiskolai tanárként a relativitáselmélet és a kvantumtérelmélet terén publikált dolgozatokat rangos külföldi folyóiratokban, s ezek némelyikére még a ma is használatos monográfiákban is hivatkoznak. Ortway Rudolf érdemeit is meg kell említenünk ezen a helyen, mert ő a kvantummechanika kiteljesedése idején, a harmincas években tekintélyes külföldi tudósokat hívott meg, a később róla elnevezett „Ortway-kollokviumokra” előadni. Ezzel lehetővé tette, hogy a korszak kiváló elméleti fizikusai, a kvantumelmélet megalkotói (pl. Heisenberg, Dirac, Sommerfeld stb.) látogattak hazánkba. Persze akkor nálunk nem voltak főállású kutatók, de az egyetemi oktatók, hallgatók és különösképpen a középiskolai tanárok ezeken az Ortway-kollokviumokon első kézből értesültek a szenzációs eredményekről. A II. világháború után az Ortway halálával megüresedett Elméleti Fizikai Tanszékre Novobátsky Károly került, aki az elméleti részecskefizika és a kvantumelmélet iránt fokozottan érdeklődő tehetséges egyetemi hallgatókból alig több mint két évtized alatt egy nemzetközileg is elismert tudományos iskolát hozott létre. Ma az ország egyetemlein és kutatóintézeiteiben dolgozó elméleti részecskefizikusok végeredményben a Novobátsky-tanítványok tanítványai. Fél évszázad alatt

számuk tekintélyesre nőtt. Többen közülük vezető kutatók, egyetemi tanárok, akadémikusok. De a világ különféle kutatóhelyein is elismert és megbecsült kutatók lettek azok, akik a jobb kutatási lehetőségek reményében elhagyták az országot.

A ma aktív magyar elméleti részecskefizikusok munkássága számos területen nemzetközi viszonylatban is jelentős. Csak példaként megemlítve néhányat: ilyen a semleges Z-bozon és Higgs-bozon tanulmányozása, erős csatolás meghatározása és gluon-jetek, elektrogyenge fázisátalakulás és a világ barionszimmetriája. Egzakt, konform és alacsonydimenziós térelméletek, húrelméletek és klasszikus térelméleti megoldások.

A kísérleti részecskefizikát hazánkban Jánosy Lajos alapozta meg kozmikus sugárzási és a modern fizika elvi kérdéseire kapcsolódó kísérleteivel (pl. foton-kísérletekkel). Itt is a tanítványok tanítványai alkotják ma azt a tehetséges gárdát, amely a KFKI-ban és részben a CERN-ben végez kutatásokat.

Hazánk 1992 óta tagja a CERN-nek. Érdemes megjegyezni, hogy a CERN-be történt magyar belépés volt az európai integrációs folyamatunk egyik első mozzanata, maga a CERN pedig az EU előképe. Ez a tagság lehetővé teszi, hogy kutatóink a világ legnagyobb részecskegyorsítóját használják, és ezzel a nemzetközi kutatások élvonalában legyenek. Mivel a CERN működtetése során az egyes országok befizetési kötelezettségei az ország bruttó nemzeti termékével arányosak, a magyar részecskefizikusok viszonylag igen alacsony befizetés mellett (a CERN teljes költségvetésének kevesebb, mint 1%-áért) a LEP (Large Electron-Positron) gyorsító két nagy detektorának (L3, OPAL) működtetésében vesznek részt. A főirány itt a részecskék tömegeiért felelős Higgs-mechanizmus vizsgálata, a Higgs-részecske keresése. Emellett fontos kutatási irány az erős kölcsönhatás részleteinek tisztázása is. Igen perspektivikusak azok a vizsgálatok, amelyek az elméleti lehetőségként felvetődött bozon-fermion szimmetriát, az ún. szuperszimmetriát próbálják bizonyítani. A magyar részecskefizikusok tevékenysége tehát szervesen illeszkedik a világ fő kutatási irányvonalához és nemzetközi mércével mérve is eredményes.

Magfizika

Az anyag legelemibb alkotórészeitől, az ún. elemi részek fizikájától indultunk el. Ha az egyszerűtől az összetett felé elvet követjük, akkor most a *magfizikai* kutatásokról kell szólnunk. Rutherford híres szóráskísérletéből 1909 óta tudjuk, hogy az atomnak van egy kb. 10^{-12} cm méretű, központi elhelyezkedésű része, amely majdnem teljes tömegét tartalmazza. Ezt nevezzük Rutherford nyomán az atom

magjának. Az atom mérete a magnak tízezerszerese (tehát annál négy nagyságrenddel nagyobb). Az atommag összetett fizikai rendszer, amely protonokból és neutronokból (közös nevükön nevezve nukleonokból) épül fel a közöttük ható ún. erős vagy nukleáris és az elektromágneses kölcsönhatás révén. Előbbi nagyon rövid hatótávolságú ($\sim 10^{-13}$ cm) és erős, míg az elektromágneses kölcsönhatás hatósugara elméletileg végtelen, és erőssége kb. századrésze a nukleárisnak. E két kölcsönhatás együtt eredményezi a magot mint a nukleonok kötött rendszerét.

A magfizika az atommag fizikai állapotait, szerkezetét, energiáját és az egymással vagy más részecskékkel történő ütközéseik során kialakuló rendszereket, magátalakulásokat vizsgálja elméleti és kísérleti módszerekkel. A nukleonok kötött állapotainak elméleti tanulmányozásához a kvantummechanikát, belső szerkezetük vizsgálatához az erős kölcsönhatások kvantumtérelméletét, az ún. kvantum-színdinamikát használják. Korábban az alacsony energiájú folyamatok, magreakciók tanulmányozása volt a kutatások fő iránya. Majd később a nagy energiájú gyorsítók építésével és felhasználásával, az ún. szórás-kísérletekből a nukleonok magon belüli eloszlására lehetett következtetni. Az egyre nagyobb energiákon pedig a nukleonok belső szerkezetéről, a kvarkok és gluonok közötti kölcsönhatás részleteiről kaphatunk ismereteket. A nukleáris rendszereket leginkább úgy tanulmányozzák, hogy a magokat felgyorsítják és ütköztetik egymással vagy más részecskékkel, és az ütközés után kirepülő újabb részek fizikai paramétereinek meghatározásából következtetnek a kölcsönhatásra, illetve a kialakult fizikai állapot sajátosságaira.

A magfizikai kutatások mai főbb irányai közül megemlítenek néhányat. Az egyik irányzat a különleges magállapotok előállítása és fontosabb sajátágaiknak a vizsgálata. Idetartoznak az erősen deformált, például két- vagy háromszorosán megnyúlt állapotok, a különböző alakzatú rezgő magok. Különösen érdekesek a külsejükön neutronréteget, ún. „neutronglóriát” viselő magok. Már hosszabb ideje folynak néhány kutatóközpontban a szupernehéz elemek előállítására vonatkozó vizsgálatok (1999-ben a 118-as rendszámú elemnél tartottak).

Fontos kutatási terület a már említett nukleonszerkezet tanulmányozása közepes és nagy energiákon mind kísérleti, mind elméleti szempontból. Az egészen nagy energiájú mag–mag ütközésekben olyan állapotok jelenhetnek meg, amilyenek a világegyetem keletkezésének korai szakaszában lehettek. Ezeknek laboratóriumi keretek közötti tanulmányozása alapvető ismereteket adhat a világról alkotott képünk alakításához. Talán még ahhoz is, hogy mi végre vagyunk jelen a világmindenségben, vagy akár csak itt a Földön.

Mindezek, amikről eddig szoltunk, alap kutatás jellegű vizsgálatok. A világról alkotott képünket gazdagítják, finomítják. De ugyanúgy, mint más tudomány-

területeknél, itt is igaz az, hogy a tudományos felismerések előbb-utóbb alkalmazásra találnak. Alapját képezik műszaki vagy más eszközöknek, eljárásoknak, amelyek végső soron az emberiség életminőségét javítják. A magfizikáról ez különösképpen elmondható. A maghasadáson alapuló atomenergia felszabadításával az atomerőművek ma jelentős és környezetvédelmi szempontból is fontos energiaforrások. Az orvostudományban alkalmazott nukleáris eszközök mind a különféle betegségek felismerésében, mind a gyógyításban nagymértékben elterjedtek és egyre fontosabb eszközökké válnak. Néhány példát említve, ilyen a mágneses magrezonanciás és pozitronemissziós tomografikus képalkotás az emberi test részéről, a gammasugárzás és a protonterápia. A radioaktív izotópos nyomjelzés nemcsak az orvostudományban, hanem az iparban, a mezőgazdaságban és a környezetvédelemben is fontos szerepet játszik. A rég feltalált nukleáris módszerek finomítása, tökéletesítése mellett a magfizika az új feladatokra új módszereket kínál. A rákterápia több fejlődési iránya is a mai magfizikához kapcsolódik. Ilyen például a nehézion-terápia, ennek radioaktív ionnyalábos változata és a szervezetbe bevitt bórral befogatott neutronok által kiváltott alfasugárzás hatásán alapuló gyógy mód. Ugyanígy megemlíthető a szív koszorúereinek izotópos vizsgálata. Az alkalmazások széles skálája még tovább sorolható.

A hazai magfizikai kutatások jól illeszkednek a nemzetközi fő irányokhoz. A fent említett területek szinte mindegyikében dolgoznak magyar magfizikusok. A kutatások többsége a KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetében és a debreceni ATOMKI-ban folyik, de az ELTE-n és a KLTE-n is értékes munkát végeznek.

A múltat is érintve röviden meg kell emlékeznünk Szalay Sándorról, aki a Rutherfordnál tett hosszabb tanulmányútjáról hazatérve elsőként foglalkozott hazánkban magfizikával az 1930-as években. Mellette tehetséges fiatalokból magfizikai iskola jött létre Debrecenben az egyetemen, amiből később az ATOMKI is létesült. Itt is elmondhatjuk, hogy ma a Szalay-tanítványok tanítványai a vezető kutatók az ATOMKI-ban. Az 1950-es években indult meg a magfizikai kutatás a KFKI-ban és az ELTE-n. Ma már ezek az intézmények nemzetközileg is nagyra értékelt kutatásokat végeznek mind az elmélet, mind a kísérlet terén.

A kutatási tematikák részletes felsorolása helyett azt hangsúlyozzuk, hogy a nemzetközi együttműködés tette lehetővé, hogy kutatóink a világ magfizikájában is megbecsült és elismert személyek lettek. CERN-tagságunk óta pedig tevékeny résztvevői vagyunk az élvonalhoz tartozó kutatásoknak. A már említett nehézion-ütközések kísérleti vizsgálatában való részvételünk nagy nyeresége a magyar magfizikának. Hozzá kell tennünk, hogy e témakör elméleti kutatásaiban már korábban is rangos elismerést arattak elméleti magfizikusaink. A külföldre távozott volt tanítványokkal és azok munkatársaival is nagyon jó a tudományos együttműködés.

Atom- és molekulafizika

Az atom- és molekulafizikai kutatások ismertetésére térve, mindjárt az elején elmondhatjuk, hogy ezek a vizsgálatok száz éve egyfolytában az érdeklődés élvonalához tartoznak. Kezdve a kezdeti atommodellektől, a röntgensugárzás és az elektron száz év előtti felfedezésétől máig, az atom szerkezetére, molekulákká történő rendkívül sokfajta összekapcsolódására, az alkotórészeit összetartó erők tulajdonságainak vizsgálatára irányuló kutatások gazdagították talán legnagyobb mértékben az anyagi világ mikroszerkezetére vonatkozó ismereteinket. Az atomokkal foglalkozó fizikai kutatások eredményei a legszélesebb körben kihatnak a természettudományok más területeire is. Mivel mindenféle anyag végül is atomokból épül fel, az atomfizika eredményeit nem hagyhatja figyelmen kívül egyetlen olyan diszciplína sem, amely akár az élettelen, akár az élő anyag valamilyen sajátosságait vizsgálja. Elég itt példaként a kémiára, a biológiára, a műszaki tudományok legfiatalabb ágaira: a mikroelektronikára vagy az ún. anyagtudományok bármely területére gondolni. Az élő szervezet működésének megértéséhez végső soron az azt alkotó atomok és molekulák fizikai állapotainak, a közöttük ható erők törvényszerűségeinek a megismerése útján juthatunk. Az atomok fizikája éppen ezekkel az alapvető kérdésekkel foglalkozik.

Az atomokra irányuló tudományos érdeklődés évszázadokra nyúlik vissza. Kezdetben a kémia jutott legmesszebb az atomok sajátosságainak megismerésében. A kvantummechanika megszületése a 20. század húszas éveiben azután megadta azt az elméleti alapot, amely lehetővé tette az atomok és molekulák szintjén való eligazodásunkat. Világképünk alakításában megdöbbentő hatása volt annak az új felismerésnek, hogy a mintegy kétszáz éven át egyeduralkodó, a korszak gondolkodóira lenyűgöző hatású klasszikus mechanika törvényei az atomok világában nem érvényesek. Érthető módon kezdetben mechanikai képpel, a Naprendszer mintájára próbálták az atom modelljét megalkotni, és a különleges viselkedést ad hoc feltevésekkel értelmezni. Csakhamar kiderült, hogy a valóság a klasszikus fizikai fogalmak radikálisabb változtatásával közelíthető meg. A Heisenberg-féle határozatlansági összefüggések azt mutatják, hogy a klasszikus mechanika olyan fogalmai, mint egy részecske pályája, nem alkalmazhatóak az atomokbeli elektronokra. A kvantummechanika a jelenségek newtoni determinisztikus leírása helyett az atomok szintjén a valószínűségekkel dolgozó leírásmódot vezette be. (A fizikai állapotot jellemző mennyiség – az állapotfüggvény – időbeli változása most is determinisztikus, de a mérés eredményére vonatkozó elméleti kijelentés valószínűségi jellegű. Vagyis annak a valószínűsége adható meg előre, hogy a lehetséges értékek milyen valószínűséggel lehetnek a mérés eredményei.)

A kvantummechanikának az atomokra és molekulákra történő alkalmazásával született meg tulajdonképpen az atom- és molekulafizika. Az elméleti magyarázatok és jóslatok a kísérletezésnek is új területét nyitották meg. Mivel a nehezebb atomok sok részecskéből (a magot körülvevő elektronokból) álló rend-

szerek, amelyek alkotórészei között elektromágneses erők hatnak, a fizikai állapotokat leíró kvantummechanikai egyenletek csak a legegyszerűbb esetekben oldhatók meg ismert matematikai eljárással.

A számítógépek felfedezése és elterjedése ezen a téren is teljesen új helyzetet teremtett, mert velük minden atomi állapot fizikai jellemzői közelítőleg ugyan, de bámulatos pontossággal kiszámíthatók és a kísérletek eredményeivel összevethetők. Korábban már említettünk egy példát, miszerint az elmélet és kísérlet közötti egyezés az atom némely tulajdonságára vonatkozóan a 13. tizedesig pontos. Meg kell említenünk az alkalmazások kezdeti szakaszának egyik leghatásosabb eredményét: a kémiai kötés magyarázatát. A kvantummechanika előtt érthetetlen volt, hogy a kifelé semleges atomok (mint pl. két hidrogénatom) hogyan tudnak összeállni molekulává (pl. a H_2 hidrogénmolekulává). A kvantummechanika tehát nemcsak az atomok szerkezetét, hanem egymáshoz kapcsolódásukat, sőt az anyag különféle halmazállapotait is tökéletesen leírja. Megint csak példaként említve a fémek rácsszerkezetét, a fémes vezetés törvényszerűségeit, a félvezetők tulajdonságait stb. Jól tudjuk, hogy ezek pedig a modern elektrotechnika, számítástechnika eszközeinek fizikai alapjait adják.

Mindezekből kitűnik: ahhoz, hogy az anyagi világot, benne az emberi szervezet felépítését, életfolyamatait egyre pontosabban megismerjük, az atomok szerkezetét és a világ többi részével való kölcsönhatásukat, tehát az atomfizikát kell részleteiben is egyre jobban megismernünk.

A következőkben a világban folyó atomfizikai kutatások közül a legjelentősebbeket említjük meg. Az atomi elektronok kötött állapotainak tanulmányozásában kísérleti szempontból jelentős haladást hoztak az egyre finomodó lézerspektroszkópiai mérések, másrészt az ún. egzotikus atomi rendszerekre (nagy-töltésű ionokat, antirészecskéket stb. tartalmazó rendszerekre) vonatkozó kutatások. Példaként említjük a hidrogénatom spektroszkópiáját, amelynek pontosságát a proton sugarára vonatkozó ismeretünk pontatlansága korlátozza. A nagy töltésű ionokon végzett röntgenspektroszkópiai (pl. Lamb-eltolódás) mérésekkel a kvantum-elektrodinamika elméleti jóslatait ellenőrzik.

A másik nagy terület, amely jelentős fejlődést hozott az utóbbi időkben, a töltött részecskék csapdázásával foglalkozik. A precíziós atomcsapdákkal végzett tömegmérések pontossága ma már majdnem eléri azt a nagyságrendet, amely lehetővé teszi, hogy a kémiai kötések energiáját a rendszer tömegének mérésével határozzák meg. Az atomi ütközések tanulmányozása az atomfizika egyik legismertebb kísérleti eljárása. Ezen a téren nagy haladást hozott az ún. COLTRIMS-berendezések (Cold Target Recoil Ion Momentum Spectrometer) kifejlesztése. Ezekkel az eszközökkel minden kirepülő részecskének mérhető az energiája és a mozgásiránya.

A precíziós spektroszkópiában történő alkalmazása mellett igen jelentős az atomoknak lézerekkel történő manipulálása. Lézeres hűtéssel érték el a kísérleti atomfizika utóbbi időkben legjelentősebb eredményét, az ún. Bose-Einstein-kondenzáció kialakulását rendkívül alacsony hőmérsékletű, ritka gázokban. Az atomoptika is az atomok mozgásának lézerekkel történő manipulálásán alapszik. Speciális lézerelrendezésekkel atomnyalábokat lehet szétosztani, tükrözni, fókuszálni, polarizálni stb.

Itt említjük meg (bár a szilárdtestfizikához is sorolhatjuk), hogy nagyon intenzíven kutatott témakör az atomok, illetve ionok szilárdtest-felületekkel való kölcsönhatása. Ilyen vizsgálatokkal mutatták ki a nagy töltésű ionok szilárdtestekkel való ütközésekor keletkező ún. üres atomokat. Ezek olyan atomi rendszerek, amelyek ugyan semlegesek, a legtöbb elektronjuk magasan gerjesztett „külső pályákon” van, a belső elektronállapotok pedig betöltetlenek.

A hazai atom- és molekulafizikai kutatásokról is elmondható, hogy általában a világviszonylatban is a legintenzívebben művelt területeken folynak, és nemzetközi mércével mérve is eredményesek. Az ATOMKI egyik legfontosabb kutatási témája az atomi ütközések vizsgálata. Így pl. a háromtest Coulomb-probléma tanulmányozása, továbbá az elektronkorreláció szerepének tisztázása az ütközésekben lejátszódó töltésátadási folyamatokban. Elektron- és röntgenspektroszkópiai módszerrel vizsgálták a többszörös ionizáció jelenségét. Pontos mérésekkel határozták meg a belső atomi állapotok nívószélességét és a különféle átmenetek valószínűségét. Kísérleti lehetőségeiket nagyban segíti a magas töltésű ionok előállítására alkalmas elektron-ciklotron rezonancia ionforrás, amely nemcsak az ATOMKI kutatóit, hanem az egyetemen folyó kísérleti kutatásokat is szolgálja. Utóbbiak közül megemlítjük a nagy töltésű ionok szilárdtest-felületekkel való kölcsönhatás-vizsgálatát, valamint az ilyen ionokból álló plazma tanulmányozását.

A debreceni kutatóhelyeken kívül a KFKI-ban, a BME-n, az ELTE-n és a JATE-n is szép eredményeket elérő atom- és molekulafizikai kutatások folynak. Ezek részben plazmafizikai, biofizikai és fizikai-kémiai természetűek. Így interdiszciplináris jellegüknél fogva másutt is megemlíthetők.

Az elméleti kutatásokkal kapcsolatban meg kell emlékeznünk Gombás Pálról és Neugebauer Tiborról, akik Ortvyai tanítványaiként a kvantummechanika atom- és molekulafizikai alkalmazásában mindjárt a kezdetekben nemzetközi szinten is az elsők között voltak. Gombás mellett tehetséges fiatalokból tekintélyes iskola alakult ki, akik nemcsak a kimondottan atomfizikai, de kvantumkémiai kutatásoknak is elismert művelői lettek. Többen közülük külföldön folytatják munkájukat. Gombás a kvantummechanikai többtest-problémáról, valamint az atom statisztikus elméletéről írott monográfiáival külföldön is elismert vezető kutatónak számított. A mai elméleti kutatók nagy része Gombás munkatársainak tanítványa.

Optika

Az atomoknak környezetükkel való kölcsönhatásaik közül különösen fontos szerepe van az elektromágneses sugárzással, speciálisan a fénnel való kölcsönhatásnak. Ez érthető, hiszen a fény kibocsátása vagy elnyelése az atom stacionárius állapotai közötti átmenetekkel függ össze. A fény természetével, fizikai sajátágaival a fizikának külön fejezete, az *optika* foglalkozik.

A tudományos vizsgálatokban nagy változást hozott az a felismerés, hogy a fény elektromágneses hullám, és ezért az elektrodinamika törvényeivel, a Maxwell-egyenletekkel, vagy kvantumos sajátosságait tekintve, a kvantum-elektrodinamikával leírható. Maxwell felismerésével és az elektromágneses hullámoknak Heinrich Hertz által történt kísérleti kimutatásával az optika az elektrodinamikának egy fejezetévé vált. A kvantummechanikának az elektromágneses sugárzásra történt kiterjesztése a fény energiájának és impulzusának kvantált természetét jósolta, amit számos kísérlet (pl. fényelektromos jelenség, Compton-effektus stb.) igazolt és ezáltal a fényre vonatkozó fizikai ismereteink a klasszikus hullámképhez képest megváltoztak. Az Einstein nyomán fotonnak nevezett fényenergia- és impulzuskvantumok bizonyos értelemben részecskejelenségekkel rendelkeznek, másrészt a hullámtermészet is igaz, hiszen a fény interferenciára és polarizáltságra is képes, ami csak a hullámtermészettel értelmezhető. E kettős természet mibenléte a kvantum-elektrodinamika alapján teljesen érthető, de a szemléletes képekhez szokott értelem nehezen tudta őket összeegyeztetni. Ezzel magyarázható, hogy a kezdetektől élénk érdeklődés nyilvánul meg iránta, időnként egészen nagy intenzitással, még a legutóbbi időkben is. Gondoljunk csak a napjainkban több helyen folyó vizsgálatokra, amelyek a fény különleges állapotait (összenyomott állapotok, összefonódott állapotok, vagy a Schrödinger-féle macska-gondolkísérlettel kapcsolatban felmerült újabb interpretációs kérdéseket) tanulmányozzák. Ezek a kutatások azt mutatják, hogy a fény mibenléteire vonatkozó tudományos érdeklődés a 20. század végén is igen élénk. Nem véletlen, hogy Einstein mintegy száz évvel ezelőtt ezt tartotta a fizika egyik legizgalmasabb problémájának. Konkrétan a fény terjedését értette ezalatt. A szemlélet számára nehezen fogható fel, hogy a fény terjedési sebessége az egymáshoz képest egyenletesen mozgó vonatkoztatási rendszerekben ugyanaz az érték. Ennek felismerése vezette őt arra, hogy a fénysebesség vonatkoztatási rendszertől független voltát tette meg a speciális relativitás egyik alapfeltevésének.

Az optikában kifejlesztett precíz kísérleti módszereket igen széles körben alkalmazzák a kapcsolódó tudományterületeken, a műszaki tudományokban és az orvosi gyakorlatban. Például a száloptikán alapuló diagnosztikai eljárások és sebészeti beavatkozások lenyűgöző eredményeket mutatnak fel napjainkban.

Az optika témakörébe tartozó vizsgálatok mindegyikét nem tekinthetjük át, csupán néhány fontosabb és a fejlődési irányt mutató kutatásra térünk ki. Mindezenelőtt a lézerfizikai kutatásokat kell megemlíteni, amelyek az utóbbi három-négy évtized legfontosabb optikai kutatásait jelentik. De mielőtt ennek részletes ismertetésére rátérünk, meg kell emlékeznünk a spektroszkópiai vizsgálatokról. Ezek jelentősége főleg az alkalmazások szempontjából igen fontos. A spektroszkópia már a 19. század vége felé nagyszerű eredményeket hozott az anyag szerkezetének a kutatásában. Elsősorban a csillagászati alkalmazások említendőek, amelyekkel következtetni lehetett a fényforrásként szereplő csillagok fénykibocsátó anyagára, tehát szerkezetére. Az ilyen jellegű vizsgálatok kifinomult módszerekkel kiegészülve ma is jelentősek nemcsak a csillagászatban és űrkutatásban, de az ipari technológiai folyamatoknál is.

Kétségtelen, hogy a lézerfizikai kutatások vannak a fejlődés fő vonulatában. A fizikának ez a fejezete egészen fiatal, hiszen 1962 óta állítanak elő lézereket, tehát az utóbbi évtizedekben fejlődött ki. A kezdeti évtizedekben a kutatás középpontjában az újfajta lézerek, új technikák tanulmányozása állt. Egy új lézer kifejlesztésének fő motivációja a jelenségek jobb megértése. Az a kérdés, hogy mire használható, nem játszott döntő szerepet. Az 1990-es évekre a helyzet gyökeresen megváltozott, ma már a lehetséges alkalmazások állnak a kutatás és fejlesztés középpontjában. Ennek megfelelően az egyik fő irány a hosszú élettartamú, stabil lézerek építése. Főképp ezzel magyarázható a fokozott érdeklődés a szilárdtestlézerek, illetve ezek hullámhossztartományának kiterjesztéseire irányuló kutatások iránt.

Ugyancsak az alkalmazási lehetőségek állnak a félvezetőlézerek terén mutató gyors fejlődés és az elért nagyszerű eredmények háttérében is. A diódalézer – lényegében tíz év alatt – laboratóriumi érdekességből a mindennapok eszközévé vált. A modern távközlés vagy információátvitel ma már elképzelhetetlen diódalézerek nélkül. A fejlődés nemcsak technikai értelemben volt látványos, hanem például a kvantumvölgyszerkezetek kidolgozására, a szilárdtestfizika fejlődésére is jelentős hatással bírt. A lézerdiódák megbízhatóságának és élettartamának növelése mellett jelenleg – és valószínűleg a következő években is – a kék hullámhossztartományban működő diódák fejlesztése áll az érdeklődés középpontjában.

A lézerfizikában alkalmazott technika gyors fejlődése azt is eredményezte, hogy bizonyos lézerfajták – paramétereik javításával – alkalmasakká váltak a széles körű felhasználásra. A legfeltűnőbb példát a femtoszekundumos lézerek szolgáltatják. A néhány éve még csúcsteljesítménynek számító 20 fs-os impulzus-időtartam ma már standardnak számít, és a világ számos laboratóriumában folynak rutinszerű mérések ilyen készülékekkel. Az utóbbi időben igen fontos eredmények születtek a femtoszekundumos molekuláris dinamika, a kvantumrendszerek opti-

mális ellenőrzése, az ultragyors biológiai folyamatok tanulmányozása, illetve az időben bontott anyagszerkezeti vizsgálatok terén.

A femtoszekundumos technika fejlődésével függ össze a nagy intenzitású fény és anyag kölcsönhatásának vizsgálatában az utóbbi időben elért, szinte bámulatos eredmény. Ma már a világ több helyén végeznek kutatásokat 10^{21} – 10^{22} W/cm² intenzitású fénnel. Ilyen körülmények között az anyagnak teljesen új jellemzői jelennek meg, például egy ilyen intenzitású fény elektromos terében egy elektron már fél periódus alatt relativisztikus energiákra gyorsulhat.

A lézeres eljárások az anyag különleges állapotainak előállításában is látványos eredményeket hoztak. Példaként említjük a lézeres hűtéssel elért eredményeket.

A modern optikához kapcsolódó elméleti kutatások részben a kísérleteket szolgálják, de jelentősek a kimondottan elméleti indíttatású vizsgálatok is. Ilyen például a fény különleges állapotainak tanulmányozása, amely a kvantumelmélet szempontjából tekinthető fontosnak, mert a kvantummechanika fundamentális kérdései ismét az érdeklődés homlokterében állnak.

Végül megemlítjük, hogy az optikai technológiák az utóbbi időben egyre növekvő szerepet játszanak a modern anyagtudományban. A felületek mikromegmunkálása, az optikai rétegleválasztás, a különleges anyagok (pl. gyémántszerű szén), illetve szuperrácsok előállítása igen fontos gyakorlati alkalmazásokat tesz lehetővé.

Mint már említettük, a lézerfizikában az utóbbi két-három évtizedben elért fejlődés olyan széles területet ölel fel az alkalmazásokkal együtt, hogy csak felvillanásszerűen térhettünk itt ki a legfontosabb jellemzőkre. Az optikára alapozott technikai alkalmazások, mint pl. a távközlés legújabb módszerei vagy a már ugyancsak említett orvosi alkalmazások talán más diszciplínáknál kapnak súlyuknak megfelelő említést.

Rátérve a hazai optikai kutatásokra, már bevezetésként megemlíthetjük, hogy a lézerfizikai témák némelyikében nemzetközi mércével mérve is az élvonalban álló kutatásokhoz kapcsolódunk és az elért eredmények is ilyenek.

Miként a megelőző fejezeteknél tettük, itt is megemlékezünk az elődökről. Annál is inkább tehetjük ezt, mert ezen a téren is kitűnő tanítómesterek voltak mind az elvi kérdések kutatásában, mind az alkalmazásokhoz kapcsolódó alapkutatásokban. Az előbbieket tekintve Selényi Pált és Jánosy Lajost kell megemlítenünk. Selényi nagyszögű interferenciakísérlete az elektromágneses sugárzás korpuszkuláris jellegének a helyes értelmezéséhez nyújt fontos kísérleti támpontot. Einstein kezdetben a foton úgy gondolta, hogy az kis térszögbe kibocsátott véges hullámvonulat, ún. tűsugárzás. Selényi kísérlete ezt a képet cáfolja. Jánosy Lajos és Náray Zsolt fotonkoincidenenciás kísérlete ugyanebbe a témakörbe tartozik. Azt igazolták, hogy az azonos fényforrásból kibocsátott, majd kettéosztott és újra egyesített koherens fénynyalábok akkor is interferálnak, ha olyan gyenge a fényintenzitás, hogy csak egy foton van egyszerre a berendezésben. Más szóval kifejezve, a „fo-

ton önmagával interferál”. A fotonra, a mechanikai részecskekép nem vihető át, hanem arról van szó, hogy a foton az elektromágneses sugárzás gerjesztettségét adja meg: az energiát és impulzust mindig $h\nu$, ill. $h\nu/c$ adagokban adja le vagy veszi fel. Sohasem töredék foton emittálódik vagy abszorbálódik. A hullámkép az állapot leírását és terjedését jellemzi.

A hazai optikai kísérletek másik korábbi szakasza a villanyégő- és a fénycsőgyártást megalapozó és fejlesztő kutatásokkal van kapcsolatban. Itt Pfeiffer Ignác, Bay Zoltán, Bródy Imre, Millner Tivadar, Szigeti György és Winter Ernő nevét kell megemlítenünk, mint a Tungsram kutatólaboratóriumának munkatársait. Bródy nevéhez fűződik a kriptonnal töltött lámpa bevezetése. A kripton gáz megakadályozza a wolframszál elpárolgását. Bay és Szigeti az elektrolumineszcens fényforrások terén érték el hasznosítható eredményeket. Gábor Dénes is ebben a laboratóriumban dolgozott kezdetben. Az ő nevéhez fűződik a plazmalámpa felfedezése, de világhírnevet a holográfia felfedezésével szerzett. Az a felismerés vezette, hogy a tökéletes optikai képalkotáshoz nemcsak a fény amplitúdóját, hanem fázisát is fel kell használni, hogy teljes információt, vagyis térbeli képet kapjunk. Elméletét 1946–1951 között publikálta (ekkor már Angliában élt), de megfelelő koherens fényforrások nem álltak rendelkezésére, ezért a hologrammok gyakorlati előállítására a lézer felfedezéséig (1962) váratott magára. A holográfia felfedezését 1971-ben Nobel-díjjal jutalmazták.

A spektroszkópiai kutatásoknak is szép hagyományai voltak hazánkban. Az 1920-as évektől kezdődően Schmid Rezső és Gerő Lóránt végeztek molekulaszpektroszkópiai kutatásokat kettő- és többatomos molekulákon. Ebből kiindulva Budó Ágoston (Szeged) és Kovács István (Budapest) mellett alakultak ki nemzetközileg is elismert molekulaszpektroszkópiai iskolák, amelyek különösen a kétatomos molekulák spektrumára, a multiplett termekre és intenzitáseloszlásokra vonatkoztak. Szegeden már a század első felében Fröhlich Pál mellett folytak optikai kutatások. Ő elsősorban a kristályok foszforeszcenciájával foglalkozott. 1950-ben Budó Ágoston követte őt a Kísérleti Fizikai Tanszék élén. Az ő irányításával kialakult iskola a molekuláris lumineszcencia jelenségével foglalkozott különféle aspektusokból. A jelenségre vonatkozó rendkívül pontos mérésekkel meghatározták a jellemző paramétereket. A lézer felfedezése után a Szegedi Egyetemen a lumineszcenciára vonatkozó vizsgálatok helyébe a lézerfizikai kutatások léptek. Különféle témakörökben a nemzetközi élvonalhoz tartozó kutatásokat végeznek szép eredménnyel.

A szegedi egyetemen folyó lézerfizikai kutatások mellett a BME Atomfizikai Tanszékén, valamint a KFKI Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetében végeznek igen értékes, nemzetközileg is elismert kutatásokat a lézerek és a nem lineáris optika terén. A témakörök felsorolása helyett csak arra szorítkozunk, hogy kiemeljük: ezek a kutatások alapkutatás jellegűek, eredményeiket számos területen – kivált a biológiában és az orvosi gyakorlatban – felhasználják.

Szilárdtestfizika és fizikai anyagtudomány

A *szilárdtestfizika* és a *fizikai anyagtudomány* az egyik legfontosabb ága a modern fizikának, amely korunk technikájának és technológiájának alapját adja. A szilárdtestfizika a fizika tudomány részeként a szilárd halmazállapotra vonatkozó

makroszkopikus és mikroszkopikus ismeretek és jelenségek megismerésével, azok mennyiségi leírásával, rendszerezésével, és a megfigyelt jelenségek értelmezésével foglalkozik.

A szilárd anyag makroszkopikus tulajdonságai mint megméréndő paraméterek jelentek meg a 19. század fenomenológiai elméleteiben: a rugalmasságtanban, a termodinamikában és az elektrodinamikában.

Ezen jelenségek mélyén megbújó atomi mechanizmusok megértésére született meg a szilárdtestfizika a 20. században. Létrejötte két eseményhez kapcsolható. Az elektron felfedezése után a fémek fizikai tulajdonságainak a leírására P. Drude, majd H. A. Lorentz szabad elektronokon alapuló modellt javasoltak, megértendő azt például, hogy miért vezeti az elektromos áramot a fém, és miért nem vezeti a szigetelő. Majd 1912-ben M. von Laue, W. Friedrich és P. Knipping elméletileg, illetve kísérletileg bizonyították a kristálybeli atomok periodikus elrendeződését. Ezek a korszakalkotó eredmények atomi szintre, elektronállapotokra és „katonás rendre” egyszerűsítették például a gyémánt tökéletes szépségét és a grafit használhatóságát. A fekete test sugárzására a Planck által kidolgozott kvantumhipotézisen alapuló eljárásnak a szilárdtestek rezgéseire való alkalmazása megmagyarázta a fájhő alacsony hőmérsékleten való viselkedését. A periodikus háttérben mozgó elektron kvantummechanikai leírása és a Fermi-féle statisztika alkalmazása választ adott arra, hogy mi a különbség a vezető és a szigetelő között. Ez vezetett hosszú távon a félvezetők megértéséhez. A tranzisztor felfedezése 1947-ben döntő fordulat volt. Forradalmasította az elektronikát, és hosszú távon a modern informatika kialakulását eredményezte.

A klasszikus szilárdtestfizika tehát a határok nélküli – vagy a végtelenséget periodikus határfeltétellel helyettesítő – tökéletes szerkezetet tekintette kiindulási alapjának. A reális szilárdtestek leírására azonban ez az ideális modell nem elégséges. Különböző rácshibákkal, geometriai és kémiai rendezetlenségekkel, a felület és méret hatásának a figyelembevételével bővült a terület. Ma már a hosszú távú kristálytani rendet egyáltalán nem mutató amorf állapot, illetve anyag, valamint a „lágy” szilárdtestek, például folyadékkristályok is a szilárdtestfizikusok érdeklődési körébe tartoznak.

A klasszikus szilárdtestfizikát alapvetően kibővítette az anyagtudománynak nevezett multidiszciplináris kutatási tevékenység megjelenése és robbanásszerű fejlődése. Az anyagtudomány a klasszikus tudományterületek közül a fizika több ágát (szilárdtestfizika, statisztikus fizika, termodinamika stb.), a kémia és műszaki tudományok bizonyos fejezeteit tekintheti elődjének. Kiindulásának sokan a tranzisztor 1947. évi felfedezését tekintik.

Ezek az ismeretek végül is a természetben adott összetételben és formában elő nem forduló anyagokban és használati eszközökben testesülnek meg. Eszkö-

zeink anyaga módot adott az emberiség történelmének egyfajta – időszakokra történő – bontására.

A jól ismert periódusok a kőkorszakoktól a réz-, bronz-, vaskorszakon keresztül napjaink informatikai anyag-, és mesterségesen előállított polimerkorszakáig vezetnek. Nem köztudott, hogy az emberiségnek ezen anyagszemléletű fejlődési szakaszait egy időben technológiafejlődés is kísérte. Ezek a korok sem a használt anyagok, sem az alkalmazott technológiák szempontjából nem lezártak; ma, a szédületesen növekvő teljesítőképességű félvezető eszközök, a mágneses és optikai információátvitel és polimerek korában is a legfontosabb szerkezeti anyag maradt az acél, az ókori eredetre visszanyúló cement mai változatai pedig a modern épített környezet meghatározó anyagát adják. Az idő, korábbi szerepét túlnőve, korunkban jelenik meg új dimenzióként az anyagtudományban; a legtöbb felhasznált anyag termodinamikai értelemben metastabil, következésképpen a tudománynak válaszolnia kell arra a kérdésre is, hogy a belőle készült eszköz meddig használható. Ebbe a kategóriába nagy értékű nemzeti vagyontárgyak (hidak, erőművek, csővezetékek stb.) tartoznak. A kutatás tárgya tehát nemcsak egy „új anyag”, hanem pl. egy „öreg híd” is lehet, célja pedig az élettelen anyag öregedésének és fáradásának a megértése.

Ezzel a társadalmi háttérrel fejlődött ki, és alakul ma is a tudományfejlődés sajátos törvényei szerint a szilárdtestfizika és az anyagtudomány fizikusi megközelítésű része, a *fizikai anyagtudomány* (SZTF-FAT).

A szilárdtestfizika szemléletében sohasem különült el a fizika többi ágától, felhasználja az atom- és molekulafizika eredményeit, a statisztikus fizika, a termodinamika, a kvantumelmélet által nyújtott módszertani lehetőségeket. Módszerei interdiszciplinárisak, eredetük az atom- és magfizikában, az elektromágneses hullámok teljes tartományában alkalmazott eszközeiben stb. keresendő. Példaként a neutronfizikai módszerek, a Mössbauer-spektroszkópia, az elektronmikroszkópia, vagy a nukleáris mágneses rezonancia említhetők.

A szilárd anyag kutatásának a fenti értelemben kibővült kérdéskörét az alábbi sarokpontokból kiindulva közelíthetjük meg: a vizsgálat tárgyát képező anyag és/vagy modell; a tanulmányozott jelenség; az alkalmazott elméleti és/vagy kísérleti módszer; és a kitűzött cél lehet, vagy ezek kombinációi lehetnek a primer meghatározó(k). A négy meghatározó elem rangsorában a szilárdtestfizika egy adott jelenség vizsgálatát és célként az alapismeretek bővítését helyezi előtérbe, a fizikai anyagtudomány első motivációja a vizsgálandó anyag, célja pedig általában egy konkrét anyaghoz vagy alkalmazáshoz kapcsolódik. Közös mindkettőben a mennyiségi leírás és a fizikai hajtóerők megismerésének a szándéka.

A világban folyó SZTF-FAT-kutatást elemezve, megállapíthattuk, hogy a „Condensed Matter” témájú cikkek száma állandó emelkedést mutat, hasonlóan az interdiszciplináris fizika eredményeihez, továbbá meghatározhattuk a legaktívabban művelt területeket, bizonyítva azt, hogy a hazai kutatógárda is ezeken a területeken dolgozik. Jelesül, a legfontosabb hazai kutatási területeket az alacsonydimenziós, erősen korrelált és komplex rendszerek; a folyadékkristályok;

az amorf, a nanokristályos, a magas olvadáspontú és metastabil fémek; a töltés- és spin-sűrűség hullámok; a vékonyréteg- és felületfizika; az ionsugaras analitika és nanotechnológia; a mágneses anyagok és jelenségek, a félvezető rétegek és heteroszerkezetek, az érzékelők, valamint az optoelektronikai kristályok és optikai anyagok vizsgálata jelenti. A kutatás része az anyagvizsgálattal összefüggő unikális módszerek fejlesztése és alkalmazása.

A kutatás szélesedő hazai és nemzetközi együttműködésben folyik, eredményességét bizonyítja a rangos nemzetközi folyóiratokban megjelent több ezer publikáció és nemzetközi konferencián elhangzott, illetve bemutatott előadás, továbbá az itthon rendezett nemzetközi konferenciák sikere.

A SZTF-FAT hazai története nem nyúlik a régmúltba, legtöbb szereplője ma is aktív.

A kezdetek a Gyulai Zoltán által vezetett iskola létrejöttéhez, Millner Tivadar wolf-ramkutatásaihoz és az elektronfizikai módszerek Pócza Jenő által történt bevezetéséhez kapcsolhatók. A mágnesség-, a félvezető- és fémkutatások, a szilárdtestelméleti kutatások, továbbá a magfizikai módszerek itthoni alkalmazásai jelentették a további induló kutatási területeket. A sikerrel művelt területekből azokat soroljuk fel, amelyeken nemzetközileg elismert, sokszor hivatkozott eredményeket értünk el, nemzetközi konferenciákat rendeztünk itthon, illetve nemzetközi rendezvényeken hallgatták meg kutatóinkat. Ezek a híg ötvözetek és a Kondo-probléma kísérleti és elméleti vizsgálata, a féművegek technológiája és széles körű kutatása, a folyadékkristályok előállítása és vizsgálata, a nem lineáris optikai kristályok előállítása és vizsgálata, a rácshibák, a fázisátalakulások, a diffúzió, a vékonyrétegek, az alacsonydimenziós és rendezetlen rendszerek kutatása, a félvezetők kutatása, a nukleáris eredetű mérés technikák és technológiák alkalmazásai. Idetartozik még az eszközeiben világszerte forgalmazásig elvitt mélynívó-spektroszkópia és a molekuláris rétegvékonyítás.

Az eredményekből két metodikai újdonságot, a neutronspinechó-módszer felfedezését és egy új szerkezetvizsgáló módszer, az atomi felbontású röntgenholográfia kifejlesztését emeljük ki. Itt az alkotók a világon elsőként mutatták meg, hogy lehetséges belső sugárforrás felhasználásával olyan röntgenhologram készítése, amely direkt módon visszaadja a szilárdtestekben elhelyezkedő atomok háromdimenziós elrendeződését.

A SZTF-FAT művelése az ezredfordulón az MTA kutatóintézeteiben, az egyetemek támogatott kutatócsoportjaiban, a tudományegyetemek (ELTE, KLTE, JATE) és a BME fizikai tanszékein folyik. A Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Alapítvány Anyagtudományi és Technológiai Intézete jelenti a SZTF-FAT egyetlen alkalmazásorientált hazai bázisát, a hazai ipari háttér pedig alig létezik.

A jövőt illetően a mérhetően végtelen összetétel, tisztaság, technológia, kezelés, előtörténet, alak, méret és kombináció szinte határtalanná teszi a SZTF-

FAT tárgyválasztékát. Tovább bővíti a lehetőségeket az új jelenségek, az új technológiák, és az új vagy jobb felbontású módszerek felfedezése, alkalmazása, a számítógépes modellezés csatornába állítása. Szükséges a szorosabb kapcsolatok kiépítése az anyagtudomány nem fizikus művelőivel.

A tapasztalatok arra tanítanak, hogy az anyagkutatásban az újdonságkeresés nem feltétlenül az extrém kísérleti körülmények hajszolásán keresztül vezet, ugyanakkor szükséges a „nagy berendezésekhez” való hozzáférés biztosítása. Jelentősebb beruházással e kutatások a régióban vezető szerepre tarthatnának igényt.

Statisztikus fizika

A *statisztikus fizika* új gondolkodási módot hozott a fizikai elméletekbe, és ezáltal nemcsak gazdagította a fundamentális kérdésekre adható lehetséges válaszok körét, de jelentősen kitágította az alkalmazások területét is. A témakör kutatói a gyors fejlődés okát általában két tényezőben szokták megjelölni. Az egyik a tér-elméletben oly sikeres renormálási csoportmódszernek az átvétele és statisztikus fizikai problémákra való alkalmazása, a másik pedig a számítógépek elterjedése és felhasználása. A részecskefizika mellett a statisztikus fizika területén volt a számítógépeknek a legnagyobb hatása.

A statisztikus fizika módszerei (számítógépes eljárásokkal kiegészülve) nemcsak a nagyon nagyszámú részecskéből álló rendszerekre alkalmazhatóak eredményesen, hanem a kis szabadsági fokú nem lineáris dinamikai rendszerek viselkedésének a megértésében is döntő szerepet játszottak. Kiderült, hogy a nem lineáris dinamikai rendszerekben fellépő ún. kaotikus mozgások is a statisztikus fizika segítségével írhatók le. Ez a klasszikus káosz mellett vonatkozik a kvantum káosz törvényszerűségeinek a felderítésére is.

A konkrét témaköröket tekintve első helyen kell említeni a fázisátalakulások részletes tanulmányozását, beleértve a magasabb rendű átalakulásokat és a skálaviselkedést is. A fázisátalakulások statikus és dinamikai elmélete után az érdeklődés a rendezetlen rendszerek felé fordult. Itt megemlíthetjük a perkolációt, az Anderson-lokalizációt és a spinüvegeket. A kapott eredmények jelentőségét növeli, hogy a fizikán túli területekre is kihatnak és gyakorlati alkalmazást nyernek. Hasonlóképpen fontos szerepe van a statisztikus fizikai eljárásoknak a polimerrek, a gélek, a szemcsés anyagok tulajdonságainak a megértésében. De ugyanilyen súllyal említhetjük a fraktálok vagy a növekedési jelenségek leírásában játszott szerepüket.

Az utóbbi időben a kutatások súlypontja áttevődött a nem egyensúlyi statisztikus fizika területére. Az elért sok szép eredmény mellett itt még az alapelveket

illetően is több tisztázatlan kérdés van. Az elmélet a kísérletekkel kölcsönhatásban fejlődik. Az egzakt elméleti módszerek és a fenomenológiai tárgyalásmód mellett döntő szerepe van a számítógépeket használó eljárásoknak. Ugyanakkor arra is rá kell mutatni, hogy a statisztikus fizika szoros kölcsönhatásban fejlődik a fizika más ágaival. A részletes felsorolás mellőzésével itt csak néhány területet említünk meg.

Az elméleti szilárdtestfizika és a statisztikus fizika között nem is lehet éles határt húzni, például a törtszámú kvantum Hall-effektus 1998-ban Nobel-díjjal jutalmazott elméletét egyaránt magáénak vallhatja mindkét tudományág.

Szoros a kapcsolat a részecskefizikával, a térelmélettel is. A térelméleti módszerek átvétele jelentősen előbbre vitte a statisztikus fizikát. Az egymásra kifejtett hatás kölcsönös, hisz a mértékelméletek rácson való tárgyalása sok elemet vett át a statisztikus fizikából. Ugyanígy joggal említhetjük a fázisátalakulások elméletét, amely újabban igen népszerű a részecskefizikában.

Az asztrofizika is statisztikus fizikai eszközöket használ, amikor az univerzum szerkezetét vizsgálja. Egészen új eredmény a fekete lyukak entrópiájának mikroszkopikus elmélete. A nem lineáris dinamikai rendszerek és a fraktálok fizikája több érdekes felismeréssel gazdagította a hidrodinamikát, elsősorban a turbulencia és a keveredési jelenségek megértését.

Különösen fontos a matematikával való kapcsolat. A valószínűség-számítást, mint a statisztikus fizika egyik alappillért, már említettük. Az újabb területekről idekíváncsoznak a sejtautomaták és a játékelmélet. A statisztikus fizika is gazdagította a matematikát, mert az itt felmerült egyes problémák a matematikának és a számítástudománynak új ágait indították el. Ilyenek az ergodelmélet vagy a bolyongások elmélete, továbbá a mesterséges ideghálózatok elmélete.

A biológiai problémákra való alkalmazás az utóbbi időben rendkívül felgyorsult, és ezen a területen egészen új távlatokat nyitott meg. Új, igen sikeres irányzat a biológiai egyedek kollektív mozgási törvényeinek felderítése statisztikus fizikai alapokon.

Egészen különös az az új kutatási irány, amelyben az emberi kölcsönhatás a meghatározó tényező. Ilyenek például a jármű- és gyalogosközlekedés bizonyos problémái. A valóságot meglepően jól tükröző és gyakorlatilag hasznosítható eredmények születtek viszonylag egyszerű statisztikus fizikai modellek alapján. Újabban a gazdasági és pénzügyi folyamatok elemzésénél is sikerrel alkalmaznak statisztikus fizikai eljárásokat.

Ezek a példák azt mutatják, hogy a statisztikus fizika az utóbbi időben a fizika rendkívül gyorsan fejlődő ága. Várható, hogy a jövőben fontos szerepet fog játszani a nem egyensúlyi jelenségek vizsgálata. Tovább fog növekedni a számítógépek szerepe. Az alkalmazások is várhatóan tovább szélesednek, és a már meg-

kezdtett területeken, mint például a turbulencia jelensége vagy a biológia egyes irányzatai újabb eredményeket hoznak. Hasonló haladásra lehet számítani a gazdasági élet területén való alkalmazásoknál is.

A magyarországi statisztikus fizikai kutatásokról megállapítható, hogy nemzetközi mércével mérve is elismertek. Sőt, nem egy helyen vezető kutatók mellett tudományos műhelyek jöttek létre tehetséges fiatalokból. Itt elsősorban az ELTE-t, a KFKI SZFKI-t, a BME-t és a Matematikai Kutatóintézetet lehet megemlíteni. A régi nagyok közül Gombás Pál neve megemlítendő, aki az atom statisztikus elméletében ért el értékes eredményeket, és a ma vezető kutatók részben az ő tanítványai voltak.

A magyar statisztikus fizikusok a fentebb említett fontosabb kutatási irányok szinte minden területén eredményesen tevékenykednek. Kezdve a fázisátalakulások dinamikáján és a kölcsönható elektronrendszerek elméletén, a rendezetlen rendszereken, a kaotikus jelenségeken, a növekedési folyamatokon, a nem egyensúlyi jelenségek vizsgálatán keresztül a kémiai, biológiai, szilárdtestfizikai és asztrofizikai, magfizikai alkalmazásokig sorolhatók a magyar eredmények. Számos területen, mint például a kritikus jelenségek dinamikája és a felületnövekedés kérdésében, kutatóink a vizsgálatok kezdeményezői voltak.

Biofizika

A fizika egyik legmodernebb vállalkozása az élő, *biológiai rendszerek* működésének megismerése és leírása. Ez a kutatás a biológia, a kémia és a fizika határterületén zajlik. A fizikusok feladata a legmodernebb biológiai és kémiai eredmények megértése és megmagyarázása. A biológiai rendszerek rendkívül összetettek, már egyetlen sejt működésének leírása is sok nehéz kérdést vet fel. A biofizika lehetséges kérdéskörei az élő szervezetben megjelenő óriásmolekulák dinamikájának vizsgálatától a sejteken át magának az élő szervezet működésének fizikájáig terjednek.

A 20. században a fizika sikeresen megmutatta, hogy ugyanazon elvek és törvények alapján képes leírni a környező makroszkopikus élettelen és élő testeket. Lényegében alapvető törvényként elegendő a kvantumelmélet és az elektromágneses kölcsönhatás ismerete, bonyolult rendszerek esetén kiegészítve a statisztikus fizika elveinek alkalmazásával. Ezeket az elveket, amelyek csodálatosan működtek eddig az élettelen rendszerek leírására, ma már – a biológiai rendszerek rendkívüli komplexitása ellenére – sikerült számos, élő rendszerre vonatkozó feladat megoldására is eredményesen használni. Tekintettel a feladatok rendkívüli nehézségére, ezek az eredmények a fizika diadalának tekinthetők. Igen fontosak a fizika által kidolgozott mérési módszerek is a kutatások eredményességének fejlődésében.

A *biofizika* manapság igen dinamikus fejlődik. Ennek fő okai:

- A természettudományok között nő az étellel foglalkozó tudományok szerepe, mivel ezeknek az ismereteknek az egyénekre és társadalomra való közvetlen hatása mindenki számára elismert.
- Az élettelen természettel foglalkozó tudományok (fizika, kémia) az élő természet vizsgálatára is alkalmazni kívánják eredményeiket. Ennek oka, hogy olyan fejlettséget értek el és olyan mélységig ismerték meg az anyag alapvető szerkezetét, ami bátorítást adott számukra sokkal bonyolultabb élő rendszerek vizsgálatára.
- Különösen a fizika rendelkezik olyan képességekkel, amelyek alkalmassá teszik az élő rendszerek vizsgálatára.

A fizika aldiszciplínái, mint például a statisztikus fizika, atom- és molekula-fizika, optika stb., olyan mértékű fejlődést értek el, amely alkalmazhatóvá tette ezeket az élő rendszerek működésének megértésére is. A modern informatika, a számítógépek kapacitásának robbanásszerű fejlődése lehetővé teszi a nagyon bonyolult rendszerek, mint például a biológiában fontos szerepet játszó óriásmolekulák mozgásának kiszámolását és pontos szerkezetének vizsgálatát röntgensugárral vagy mágneses rezonancia-spektroszkópiával.

A fizika kísérleti módszereinek lendületes fejlődése a biológiában eddig megvalósíthatatlan vizsgálatokat tesz lehetővé. Lehetőséggé vált például spektroszkópiai módszerekkel egyes molekulák kimutatása és tulajdonságaik meghatározása, sejtek szétválogatása tulajdonságaik alapján, biológiai folyamatok – molekuláris mozgások – időbeli követése nagy pontossággal stb.

A biofizika mellett új szemléletű fizikai kutatások is megjelentek, amelyeket *biológiai fizika* név alatt gyűjtene össze ma a világ kutatói. Ezek olyan kutatások, amelyekben a fizikusok, eredeti érdeklődési körüket megtartva, biológiai kérdésekkel foglalkoznak, és a felmerülő kérdéseket saját megközelítéssel próbálják megválaszolni.

A biofizika nemzetközileg vizsgált legfontosabb területei közül – a teljesség igénye nélkül – a következőket emeljük ki:

- Az élő szervezetben szerepet játszó óriásmolekulák (fehérjék, nukleinsavak) szerkezetének és dinamikájának vizsgálata. Egyik legfontosabb feladat annak megértése, hogyan határozza meg a felépülő élő rendszert a DNS-molekulában lévő genetikai kód. Ennek megválaszolásában segíthet a statisztikus fizikai módszerek alkalmazása. A molekula szerkezetének meghatározásában az NMR-spektroszkópia és a röntgendiffrakciós módszerek játszanak fontos szerepet. Ezen túl fontos a molekulák dinamikájának leírása mozgásegységeik megoldásával.

- Biológiai szerkezetek (membránok, sejtek, szervek, egyebek) szerveződésének és dinamikájának leírása. Fontos az élő rendszer működésének megértéséhez az egyes alkotóelemek kölcsönhatásának és együttműködésének megmagyarázása. Ezekben a kutatásokban a fizika összes eszközét bevetik.
- A biológiai energiaátadás és energiaátalakítás vizsgálata. Az energiaátalakító rendszerek, fehérjemolekulákból álló gépek működésének leírása.
- Hogyan és milyen módon szabályozódnak az élő rendszerekben az egyes folyamatok (pl. anyagcsere-folyamatok)?
- Az idegrendszer, a biológiai információs rendszer és a gondolkodás mechanizmusainak vizsgálata mind kísérleti, mind pedig elméleti úton.
- Óriási szerepet játszik az újabb kutatásokban, hogy egyetlen részecskét (molekulát) elválasztva, külön lehet manipulálni. Erre új eszközök állnak rendelkezésre: az atomerő-mikroszkóp (AFM) és az újabban kifejlesztett lézercsipesz. De fontos szerepet fog játszani a korábban már említett lézeres hűtés, lézeres csapdázás is az egyrészecske-megfigyelési eljárásokban.

Hazánkban a biofizikai kutatások az utóbbi évtizedben rendkívüli módon fejlődtek. A kutatások messzemenően a nemzetközi irányzatokhoz igazodnak és részben nemzetközi együttműködések keretében folynak.

A fizika biológiai rendszerekre való alkalmazásának magyar úttörőiként Neugebauer Tibort és Békési Györgyöt nevezhetjük meg.

Neugebauer Tibor egyrészt a fiatal kvantummechanikát kívánta biológiai rendszerekre alkalmazni, másrészt a különböző élő rendszerek fizikájával foglalkozott (pl. élőlények repülése, a természet színei).

Békési György hazai kísérleti kutatásai során megértette a hallás fizikáját, majd kiterjesztette elképzeléseit a többi érzékelés kérdésére.

Biofizikával foglalkoznak a budapesti, debreceni, pécsi és szegedi egyetemeken működő biofizikai tanszékek: JATE Biofizikai Tanszék, POTE Biofizikai Intézet, DOTE Biofizikai és Sejtbiológiai Intézet, SOTE Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet és a közelmúltban alakult ELTE Biológiai Fizika Tanszék. Idevágó kutatásokat végeznek még az ELTE Elméleti Kémiai Laboratóriumában és Szerves Kémiai Tanszékén is. Fontos kiemelni a DOTE-n működő PET-centrumot.

A magyar biofizikai kutatások vezérhajója az MTA Szegedi Biológiai Központ Biofizikai Intézete. Fontos kutatásokat végeznek még ezen a téren az MTA SZBK más intézeteiben (Növényélettani, Enzimológiai Intézet) és az MTA KFKI RMKI-nak az atomfizika biológiai alkalmazásaival foglalkozó fizikusai is.

A magyarországi kutatások messzemenően követik a nemzetközi irányzatokat. A fent felsorolt kutatóhelyeken nagyon értékes kutatások folynak a koráb-

ban említett témákban. Kiemelkedően kutatott terület a fehérjék dinamikája, sajátságai, szerkezetük és működésük vizsgálata. Meghatározó szerepet játszanak az MTA SZBK intézetei, elsősorban a Biofizikai Intézet, de a többi felsorolt intézetben is jelentős kutatások folynak ezen a területen.

Ugyancsak fontos kutatásokat végeznek a biológiai membránok szerkezete és dinamikája terén számos intézetben. Több érdekes téma fut ezen a területen az MTA SZBK Biofizikai Intézetében és az ELTE Biológiai Fizika Tanszékén. Új kutatási irány az ELTE Biológiai Fizika Tanszékén az élőlények kollektív mozgásának és az evolúciós modelleknek a tanulmányozása.

Meg kell említeni az alkalmazott kutatások körében a káros környezeti hatások, különösen az UV-sugárzás élő szervezetekre gyakorolt hatásának, ezek molekuláris mechanizmusának jellemzésére és a védekezés stratégiájára vonatkozó kutatásokat a SOTE Biofizikai és Sugárbiológiai Intézetében.

Csillagászat és űrfizika

A csillagászati és űrfizikai kutatások esetében abból indulunk ki, hogy a világminőség égitestjeinek mibenléte, kialakulásuk, mozgásuk, a földi jelenségekre gyakorolt hatásuk az emberi civilizáció kezdetétől fogva foglalkoztatja az emberiséget. Részben ezek az ún. csillagászati megfigyelések és a megmagyarázásukat kereső emberi gondolkodás hozta létre a természettudományoknak nem egy ágát, másrészt ezeknek az új diszciplínáknak a segítségével fejlődött a csillagászat mára odáig, hogy a világűrbe kijuttatott laboratóriumok modern tudományos eszközeivel közvetlenül kutathatja a Földtől távoli égitesteket, galaxisokat.

A csillagászat különösen a fizikával áll igen szoros kapcsolatban. Egymást kölcsönösen megtermékenyítve alakítják a világról alkotott tudományos képünket. Példaként elég itt két dolgot megemlíteni. A Nap körüli bolygórendszer mozgásának a Newton-féle mechanika mozgástörvényei alapján való leírása a ptolemaioszhoz képest rendkívül egyszerű lett és összhangban volt a megfigyelésekkel. A klasszikus mechanika heurisztikus ereje és hatása először éppen a bolygók mozgásának pontos matematikai leírásában nyilvánult meg. A másik példa az Einstein-féle általános relativitáselmélet, amely a tér-idő geometriai szerkezetét leíró gravitációs egyenletekkel a világegyetem keletkezésére és fejlődésére vonatkozó tudományos ismereteinknek teremtette meg az alapját. A térben és időben távoli galaxisok megfigyelése és a rendkívül nagy energiájú részecskefizikai kísérletek a legnagyobb és a legkisebb tartományok kutatásával keresik a válaszokat olyan kérdésekre, amelyek az univerzum kezdeti állapotára vonatkoznak. E kiragadott példákkal csak azt akartuk érzékeltetni, hogy a fizika

és a csillagászat kölcsönösen hatott és hat egymásra, és ezáltal tökéletesedik a világról alkotott képünk.

A megfigyelések túlnyomórészt az égitestekről érkező elektromágneses sugárzás különféle fizikai paramétereinek mérésein alapulnak. A galaxisok távolságának meghatározásához például a spektrumvonalak vörös felé való eltolódásának a mérését és a Hubble-féle törvényt használjuk fel. Utóbbi szerint a távolodó galaxis sebessége annál nagyobb, minél távolabb van tőlünk. De az elektromágneses hullámokon kívül a kozmikus sugárzásban hozzánk érkező elemi részek, különösen a neutrínók is igen értékes információkat hordoznak.

Jelenleg a csillagászati és űrfizikai kutatások a Naprendszer kis égitestjeitől a csillagokon, csillagrendszereken, galaxisokon, galaxishalmazokon át a teljes univerzum vizsgálatáig minden méretskálán folynak.

A kozmológia a világegyetem legnagyobb léptékű szerkezetét, illetve a jelenleg megfigyelhető struktúrák eredetét vizsgálja. Ehhez elméleti alapot – miként már említettük – az általános relativitáselmélet ad, kísérleti eszközként pedig a nagy távcsövek és számítógéprendszerek szolgálnak. A kutatások egyik fő célja az, hogy minél több galaxisról kapjunk pontos értéket a vöröseltolódásra, ezáltal egyre részletesebb térképet az égi objektumokról. Elméleti szempontból igen fontos lenne az ún. Hubble-állandó értékének és a kozmológiai állandónak a pontos meghatározása. Ezek ugyanis a relativitáselméleti modell szerint az univerzum tágulására és esetleges összehúzódására adhatnak információt. Végso-ron arra is, hogy miként keletkezett a világ, vagy esetleg arra, hogy nem is keletkezett, hanem öröktől fogva van.

Ugyancsak fontos elméleti kérdés az ún. sötét anyag léteire vonatkozó információgyűjtés. A megfigyelések egy része ugyanis azt mutatja, hogy az univerzum anyagának csak egy kisebb hányada bocsát ki elektromágneses sugárzást, vagyis „látható”. A nagyobb hányad nem látható, csak gravitációsan érzékelhető. Ebből a szempontból érdekes lehet, hogy a neutrínóknak létezik-e nyugalmi tömegük. Mert ha igen, akkor a neutrínók lehetnek a sötét anyag megjelenítői. Itt megint a csillagászat és a részecskefizika összefonódásával találkozunk.

A megválaszolatlan kérdések köréhez tartozik az is, hogyan jöttek létre a világegyetem struktúrái. A háttérsugárzás izotrópiája ugyanis arra utal, hogy a kezdeti állapot igen nagy mértékben homogén és izotróp volt.

A csillagászati kutatásokban kitüntetett szerepe van a Nap kutatásának. Jelenleg az elektromágneses sugárzás teljes tartományában folynak vizsgálatok. A korpuszku-láris sugárzás és a napszél fizikai sajátosságai jelentik az egyik legfontosabb vizsgálati területet. A napszélnek a földi légkörre kifejtett hatása igen jelentős. A Naprendszerbe küldött űrszondák a bolygóközi anyagról, az ottani fizikai viszonyokról adnak fontos felvilágosítást.

A csillagok neutrínósugárzásának fontos szerepe van a csillagok szerkezetének, energiatermelésének a tanulmányozásában. Ezek a részecskék csak az úgynevezett gyenge kölcsönhatásban vesznek részt, ezért az anyagon gyakorlatilag korlátlanul áthatolnak és a csillag fizikai állapotáról veszteségmentesen hoznak információkat. A Nap neutrínósugárzására vonatkozó megfigyelések azt mutatják, hogy a jelenlegi elméleti modell jóslatánál kevesebb neutrínó érkezik a Földre. Ez arra utal, hogy a modell feltevései nem helyesek, vagy pedig a Nap energiatermelése változik az időben.

Ma a csillagászatban és az űrfizikai kutatásokban a legfejlettebb technikát használják kísérleti eszközökként. De talán még ennél is fontosabbak a nagy teljesítményű szuperszámítógépek nyújtotta lehetőségek. Egyrészt ezek teszik lehetővé a világűrbe kijuttatott mérési berendezések működtetését, másrészt a nagy mennyiségű információs adat feldolgozását.

Magyarországon az 1635. évi egyetemalapítás óta folyamatosan van csillagászati kutatás és oktatás. Ennek új lendületet adott a Konkoly Thege Miklós által 1871-ben Ógyallán létesített obszervatórium. Az intézet fő profilja az asztrofizika volt. Nem sokkal később a magyar asztrofizika két jelentős létesítménnyel gazdagodott: 1877-ben a kalocsai, 1881-ben a Gothard-féle herényi csillagvizsgálóval. A Konkoly- és a Gothard-féle intézetek a spektroszkópiára alapozták megfigyeléseiket, a kalocsai pedig napfizikával foglalkozott. Konkoly Thege Miklós 1899-ben a magyar államnak adományozta intézetét, és ezzel létrehozta a jelenlegi MTA Csillagászati Kutatóintézet jogelődjét. A kalocsai érseki csillagvizsgáló 1951-ben megszűnt, a Gothard Obszervatórium jelenleg az ELTE-hez tartozik. 1976-ban létesült Pécen a Kozmikus Geodéziai Obszervatórium, ahol rádiócsillagászati kutatások folynak.

Jelenleg az említett intézeteken kívül az ELTE Csillagászati Tanszékén és az Atomfizikai Tanszéken, továbbá a JATE-n folynak csillagászati kutatások. Az ELTE Atomfizikai Tanszékének munkatársai szoros együttműködésben vannak az USA-beli Johns Hopkins Egyetem, továbbá a Pennsylvaniai Állami Egyetem kutatóival. Részt vesznek napjaink egyik legjelentősebb asztrofizikai projektjében, a Sloan Digital Sky Survey-ben, amely sok millió vöröseltolódási adat segítségével megteremti a nagy pontosságú empirikus kozmológia lehetőségét.

Hazánkban a megfigyelő asztrofizikának hagyományosan három fő területe alakult ki: a csillagászati fotometria, a Nap felszíni jelenségeinek, illetve a Naprendszer kis égitestjeinek a vizsgálata. Mindhárom terület közös sajátossága, hogy a megfigyelésekben döntő szerepe van az észlelés időpontjának, mert a megfigyelt objektum még egyszer nem fog ugyanúgy viselkedni.

A változó csillagok asztrofizikai kutatása hazánkban közel egy évszázada folyik. Az MTA Csillagászati Kutatóintézetében több évtizede vizsgálják a gömbhalmazokban, a Tejútrendszerben levő legöregebb objektumokban található RR

Lyrae típusú változókat. A fényváltozás időbeli lefutását leíró görbe alakja és bizonyos fizikai paraméterek között szoros kapcsolatot találtak, aminek alapján pontos becslést sikerült adni a csillag nehézelem-tartalmára, abszolút fényességére. Az ilyen típusú csillagok hosszú távú megfigyelésével a csillag fejlődésére próbáltak következtetni, és a fejlődésre vonatkozó elméleti jóslatokat igyekeztek igazolni vagy cáfolni. Találtak olyan változásokat, amelyek az elméleti várakozásoknak ellentmondanak. A pulzáló, változó csillagok vizsgálatában nemzetközileg is jelentős eredmények születtek. Bebizonyították például, hogy az R Scuti csillag pulzációja kaotikus. Tanulmányozzák a kettős csillagok fedéstől származó fényváltozásait, amelyek segítségével következtetni tudnak a komponensek közötti anyagátáramlásra, esetleg harmadik, nem látható test jelenlétére.

A Napra vonatkozó kutatásokat illetően megemlíjtük, hogy a debreceni Napfizikai Observatóriumban található a világ legteljesebb napfelszín-adatbázisa. A napfoltok alakjának és helyzetének nyomon követésére igen pontos módszert fejlesztettek ki.

A Naprendszer kis égitestjeinek, az ún. kisbolygóknak és üstökösöknek a vizsgálata is eredményes kutatási területe a Csillagászati Kutatóintézetnek és a Szegedi Egyetem csillagászaiknak. Sok kisbolygót fedeztek fel, aminek következtében többnek magyar neve van. Az ELTE Csillagászati Tanszékén a kisbolygók elméleti tanulmányozásához a Napból, a Jupiterből és a vizsgált kisbolygóból álló rendszerre alkalmazott korlátozott háromtest-probléma megoldásait keresik.

A piszkéstetői Schmidt-teleszkóp segítségével olyan kutatások folynak, amelyek a csillagok keletkezésére vonatkozóan adhatnak fontos információkat. Ezek során felfedezték a Cepheus csillagképben lévő gyűrű alakú képződményt, amely fizikai kapcsolatot létesít több, a csillagkeletkezésben aktív terület között, és az ún. indukált csillagkeletkezésre ad bizonyítékot.

A KFKI-ban már néhány évtizede végeztek kutatásokat a kozmikus sugárzásra vonatkozóan. Jánossy Lajos hazatérése az 1950-es évek elején ennek új lendületet adott, s többen ezt választották kutatási területül. Ezek folytatásaként az 1970-es évektől kezdve végeznek ún. űrfizikai kutatásokat. Kezdetben a mesterséges égitesten végzett plazmafizikai mérések számítógépes kiértékelésében vettek részt. A Halley-üstökös vizsgálatára indult VEGA-program során nyílt először lehetőségük fizikai eszközöket űrszonda felületén működtetni. 1986 márciusában először sikerült közeli képeket továbbítani a Földre egy üstökös magjáról. A képek kiértékelése adta az első megbízható információt az üstökös magjának méretéről, forgásáról, a felszíni porkilövellésekről. A Mars körül keringő Phobos űrszondával végzett kutatásokban is eredményesen vesznek részt a KFKI űrfizikusai. Emellett továbbra is foglalkoznak a nagy energiájú szoláris és interplanetáris részecskék, valamint a ga-

laktikus kozmikus sugárzás naprendszerbeli terjedésének elméleti vizsgálatával és modellezésével.

Ma is sikeresen folynak a Csillagászati Kutatóintézet által 1958-ban létesített és 1972-ig fenntartott optikai műholdkövető hálózatának megfigyeléseiből ki-fejlődött felsőlégköri kutatások. Az elsősorban a COSPAR kongresszusain be-mutatott magyar eredmények új effektusok felfedezésével és leírásával járultak hozzá a semleges felső légkör modelljeinek javításához, ami fontos a műholdak várható élettartamának számításához. Planetológiai kutatások is folynak, a Hubble-űrtávcső megfigyelései alapján például több üstökös magjának méreteit sikerült meghatározni.

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy a magyar csillagászat a Konkoly-féle intézet megalakulásától kezdve követte az élvonalbeli nemzetközi kutatóso-kat, az anyagi lehetőségeinek keretei között eredményesen járul hozzá azokhoz. Sikerral találták meg azokat a területeket, ahol szerényebb eszközeikkel is ered-ményesen kapcsolódtak a csúcstechnológiával folytatott projektekhez. Így sike-rült a nemzetközi tudományos vérkeringésben maradniuk, és ezáltal saját méré-seiknek az értéke a csúcstechnológiával végzett kutatásokhoz kapcsolva jelentő-sen megnőtt.

Az elődök munkásságára visszatekintve Lassowszky Károly és Detre László nevét kell megemlíteni. Detre László több évtizedig irányította a Csillagászati Kutatóintézet munkáját, valamint az egyetemi oktatást. A mai vezető csillagászok az ő tanítványai. A Csillagászati Ku-tatóintézet fő kutatási irányát, a változó csillagok kutatását Detre kezdeményezte. A külföldre távozott, eredményes Detre-tanítványok közül a korán elhunyt Izsák Lajost kell említenünk.

Sugárvédelem, környezetfizika, reaktorfizika

Az *atommagenergia* felfedezése és békés, valamint hadi alkalmazását a társadalom a fizikusok eredményeként ismeri el. Ezért az ő kötelességük, hogy a különböző természetes és mesterségesen keltett sugárzások elleni védekezéssel foglalkozza-nak.

A kialakult alkalmazott kutatások összességében a *sugárvédelem* témakörébe tartoznak. A sugárvédelem az ionizáló sugárzások mérésével, hatásaival és az embereknek ezektől a sugárzásoktól való megvédésével foglalkozik. A sugárzá-sokat keltő magfizikai folyamatok – radioaktív bomlások – a magfizikusok által jól feltártak. Sokkal nehezebb feladat ezek biológiai hatásának és az okozott ma-radandó károsodások mértékének pontos meghatározása. Ez a sugárvédelem és a biofizika közös feladata. Így ez az aldiszciplína lényegében a magfizikát, a bio-fizikát, az orvostudományt és a műszaki tudományt közösen érintő interdiszcipl-ináris kutatásokat tartalmaz.

A kezdeti kutatások egészségügyi szempontból a mesterséges sugárzásra kívántak korlátokat szabni. Ezek feltétlenül szükségesek voltak abból a szempontból, hogy egy műszakilag konstruált berendezés (atomreaktor) számára szabványokat állítsanak fel méretezésekor és működtetésekor. Meg kellett határozni a sugárdózisok veszélyességi szintjeit, hogy balesetek esetén meg lehessen tenni a megfelelő intézkedéseket.

Mára már azonban a többi sugárzás vizsgálata is fontossá vált. Köztudott, hogy állandó sugárzások érnek mindenkit. Ennek oka lehet például geológiai, kozmikus, egyéb műszaki (pl. salakbeton építkezés), vagy orvosi kezelésekből származó. Fontos tehát minden szempontból, hogy mindezen sugárzásokat egyrészt feltérképezzék, másrészt pedig megállapítsák, hogy milyen dózisszint tekinthető elfogadhatónak az élet egészséges körülményeinek kialakítására. Különösen elkerülhetetlen feladat ez azért, mert sok ember az egyéb sugárforrásokból a reaktor és a hulladéktárolók műszaki minimumául megszabott sugárdózist messze meghaladó mennyiséget kapva éli normális, egészséges életét.

A jelen kutatások fontos feladata annak meghatározása, hogy van-e és mi az a küszöbérték, amely mellett az emberi szervezet még képes a regenerálódásra, védekezésre. Másrészt újabb eredmények azt is mutatják, hogy genetikai okok miatt vannak olyan embercsoportok, amelyek sokkal érzékenyebben reagálnak a sugárzásra, mint a többiek. A kutatások fő iránya tehát a biológia, a biofizika és az orvostudomány kezében van. Feladatuk azt kideríteni, hogy milyen tartós sugárzási szintet képes az emberi szervezet károsodás nélkül elviselni.

A sugárvédelem másik fontos feladata a fizikusok számára mind pontosabb mérési módszerek kidolgozása, amelyekkel lehetséges a kapott dózis állandó megfigyelése. A kérdések középpontjában áll a reaktorhulladék, a hulladéktárolás vagy hulladékmegsemmisítés megoldása.

A radioaktivitás kutatásával hazánkban először Hevesy György foglalkozott. Budapesti kutatásai során született a radioaktív nyomjelzés gondolata, amit később biológiai és orvostudományi kutatásaiban használt. Bozóky György vezette be Budapesten a 20. század közepén a sugárterápiát. Szalay Sándor a természetes radioaktivitás földrajzi eloszlását vizsgálva fedezte fel a dunántúli uránlelőhelyeket.

A témával foglalkozó hazai kutatóhelyek közül az Országos Sugárvédelmi és Sugáregészségügyi Intézetben kutatások folynak például:

- a biológiai korrózió szerepéről a nukleáris hulladéktárolókban;
- az ionizáló sugárzás genetikai hatásáról;
- élőállat-kísérleteken vizsgálják, hogy az élő szervezet képes-e kivédeni bizonyos mennyiségű sugárterhelést.

Az ELTE Atomfizikai Tanszéke a RAD Lauder Laboratóriummal együttműködve készíti a lakóhelyek radongáztól származó lakossági sugárterhelésének

feltérképezését, és az egészségügyi statisztikákkal összevetve ennek káros következményeit vizsgálja.

A Veszprémi Egyetemen a baleset esetén fellépő sugárterhelés lehetséges optimalizálását vizsgálják. A SOTE-n az egyik fő kutatási téma az ionizáló és nem ionizáló sugárzások hatásvizsgálata. Az ATOMKI-ban a belső sugárterhelést okozó radioaktív aeroszolt mérik, és befejezték a hazai (gyógyhatású) barlangok radioaktivitásának felmérését. Az MTA RMKI-ban új, pehelykönnyű dozimétert fejlesztettek ki (pille).

A sugárvédelmi kutatások rendkívül fontosak mind egészségügyi, mind pedig műszaki szempontból, így folytatásuk nemzeti érdek.

Az emberiség a 20. század végén megdöbbenéssel vette észre, hogy a modern társadalom és az ipar fokozatosan rombolja a környezetet, aminek hosszú távon katasztrofális következményei lehetnek. Ez indította el a környezet változásainak és a környezeti hatásoknak egyre dinamikusabb vizsgálatát. A kutatások alapját a *környezettudomány* adja, amely olyan fizikai elvek és módszerek kidolgozására törekszik, amelyek segítségével mérni lehet a környezet állapotát jellemző paramétereket, előre lehet jelezni a károsító tényezőket és terjedésüket, valamint meg lehet becsülni a biológiai kockázatot.

Tekintettel az emberiség jövőjére való befolyásra, az ENSZ és az Európai Unió is szigorú elvárásokat szab a környezetvédelemre. Például az EU 5–KTK környezettudományi kutatási programokat fogalmaz meg, többek között környezet és egészség, vízminőség, globális klímaváltozás témákból.

Hazánkban is erőfeszítéseket tesznek a környezetkutatás fejlesztéséért. A környezettudományi kutatásokkal foglalkozó intézetek és fontosabb témák a következők:

- Az Atommagkutató Intézetben a levegő minőségét jellemző paraméterek (összetétel, szennyezések, aeroszol-tartalom) meghatározásával és a természetes és mesterséges hatások nyomon követésével foglalkoznak.
- Az Atomenergia-kutató Intézetben a levegő por empirikus figyelésével foglalkoznak, ami lehetővé teszi egy kiválasztott helyszínen levegőminőségének elemzését és elméleti leírását.
- Az ELTE-n egyrészt a levegő nehézfém-szennyezettségét tudják mérni precíziós atomfizikai módszerekkel, másrészt elméleti vizsgálatokat folytatnak a 21. század legfontosabb globális környezeti problémáiról, mint például az üvegházhatás hosszú távú következményeiről.
- A KLTE-n működő neutrongenerátor segítségével keltett γ -fotonok segítségével az anyagminták roncsolásmentes kémiai elemzését képesek végrehajtani. Ez lehetővé teszi
 - az erőművi szénkörnyezetszennyező hatásának meghatározását;

- a szállítókonténerekben lévő veszélyes és tiltott anyagok felismerését;
- a tartályokban a mérgező anyagok felismerését és mennyiségük meghatározását.
- A SOTE-n az ózonlyuk helyi kiterjedése miatt megnövekvő kóros ultraibolya-B sugárzásra dolgoztak ki mérési módszert, és vizsgálják a biológiai rendszerekre való közvetlen káros hatások mértékét és mechanizmusát. A módszer lehetővé teszi személyi UV-B doziméterek kifejlesztését. Kidolgoztak egy, a vegyszerek káros hatását számszerűen jellemző skálát és módszert ennek mérésére. Sajnos ezen berendezés a megfelelő jogi háttérintézkedések hiánya miatt eddig nem került kötelező alkalmazásra.
- Az Országos Sugárvédelmi és Sugáregészségügyi Kutatóintézetben például a rádiótelefonokból származó rádiófrekvenciás sugárzás esetleges károsító hatását vizsgálják.

A környezetfizikai kutatások egyre hangsúlyosabb részévé válnak az alkalmazott fizikai kutatásoknak, hiszen a társadalom egyre fontosabb feladatnak tartja a környezeti hatások mind pontosabb megismerését és a környezet megóvását.

A *reaktorfizika* feladata a reaktorok konstrukciójának és biztonságos működtetésének fizikai megalapozása; reaktorokban keletkező részecskék fizikai kísérletekben való felhasználása, és az egyéb (biológiai, kémiai, orvosi stb.) alkalmazások részére izotópok előállítása. Ezért a fizikusok központi szerepet játszanak ebben a tudományban.

A nemzetközi kutatások elsősorban a reaktorok biztonságával, a minél szigorúbb biztonsági rendszabályok kidolgozásával foglalkoznak. Fontos probléma a keletkező radioaktív hulladék tárolása vagy esetleges megsemmisítése, hogy a mai társadalom energia iránti mohósága ne hagyjon veszélyes örökséget az utódokra.

Hazánkban Pakson működik az egyetlen energiaszolgáltató reaktor. A hazai alkalmazott reaktorfizikai kutatások elsősorban ennek a reaktornak biztonságos működését szolgálják. Ezen túl további kísérleti tanreaktorok találhatók Budapesten (Atomenergia-kutató Intézet, Budapesti Műszaki Egyetem).

Az Atomenergia-kutató Intézetben olyan számítógépes ellenőrzőrendszert fejlesztettek ki, mely a neutronsűrűség változásait követve szigorúan fizikai alaptörvényekre alapozva írja le az erőmű működését. Ezért ez a program a reaktorban bekövetkező fizikai folyamatoknak olyan precíz követését teszi lehetővé, hogy az azt használó paksi atomreaktor biztonságossága nemzetközileg elismert. Ezt a programot az egyre nagyobb és jobb számítógépes háttér, valamint az új fizikai ismeretek alapján rendszeresen továbbfejlesztik.

Kötelező feladat a reaktorok élettartamának becslése, a reaktortartály sugárkárosodásának ellenőrzése. Törvény írja elő a használt fűtőanyagok elhelyezésének

megoldását és néhány évtized múlva a reaktor leszerelését. Ez számos tudomány (geológia, kémia, biológia, meteorológia) együttműködésével végzendő feladat.

A magyar atomreaktorok segítik az anyagszerkezeti, geológiai, magfizikai, biológiai, orvostudományi kutatásokat. A reaktorfizikai kutatások aktív folytatása elengedhetetlenül fontos feladat.

A kutatás intézményi háttere

Az utóbbi években megváltozott az egyetemek és az MTA kutatóhálózata közötti viszony, szorosabb lett az együttműködés. A kihelyezett tanszékek, a Széchenyi professzori ösztöndíj, a személyes kapcsolatok alapján az egyetemek a kutatóintézeti kapacitást a laboratóriumi képzésben, a speciális kollégiumok kibővítésében, a diplomamunkák és PhD-disszertációk készítésében, röviden a magasabb szintű képzésben és a továbbképzésben veszik igénybe. (A PhD területén nem ártana a „de facto” helyzet „de jure” rendezése.) Ilyen értelemben kutatóintézeteink jó néhányát megilletné az „oktató kutatóintézet” rang.

Az eszközállomány előregedése, és hiányos volta két szempontból is gondterhes. Az 1970-es évek nyugati országokhoz képest szerény, hazai viszonylatban kiemelkedő beruházásai képezik sok helyen ma is a közép-műszer-kategória gerincét. Azóta csak az egyetemeken történt kisebb volumenű fejlesztés, pedig a színvonalas kutatás a világon ma már nem is emlékszik akkori helyzetére. Továbbá eltűnt vagy minimálisra csökkent az a mérnöki-technikusi háttér, amelyik korábban eszköz- és módszerfejlesztéssel vagy -kiegészítéssel állt a kutatók mögött. A piacon kapható új eszközök is bizonyos mértékben már le vannak maradva az élvonalhoz képest, mert az élvonal mindig tartalmaz hozzáadott egyedi elemet.

A technológiai/technikai háttér elszegényedése tulajdonképpen az előbbi gond folytatása, mégis külön ki kell emelni. A kísérleti fizikai kutatás pontosan definiált tulajdonságú anyagmintákat igényel, ezek pedig ritkán vásárolhatók meg a boltban. A technológus kutató – aki a kívánt mintákat elő tudja állítani – pedig még kevesebb elismerésre számíthat, mint az anyagmintát megrendelő, és azon méréseket végző kutatótársa.

Az informatikai háttér, a középszintű számítógép-hálózatot tekintve elfogadható, azonban szükséges a nagy teljesítményű számítóközpontokhoz (pl. NATO-gépekhez) való csatlakozás megteremtése. Továbbá komoly problémák vannak a könyvtári ellátásban, ami mind intézeti, mind akadémiai szinten folyamatosan romlott az elmúlt években. Ennek megállítása a kutatás létkérdése, hiszen a kutató egyik legfontosabb „munkaeszköze” a tudományos irodalom; ennek ismerete nélkül nincs modern kutatás.

A tapasztalatok arra tanítanak – és reméljük, hogy az elmondottak is azt illesztik –, hogy a fizikai kutatásban az újdonságkeresés nem feltétlenül az extrém külső körülmények hajszolásán – különösen, ha annak extrém az anyagi vonzata is – keresztül vezet. Ez a kutatói igény szegény országok kutatói számára úgysem reális. A lineáris extrapoláció, mint kísérleti kutatási stratégia helyett a meglévő ismeretek új módon való összekapcsolása és felhasználása, valamint új felismerések keresése tekinthető kutatói célnak. Nem egy nagy berendezés – ami egyébként is csak hazai léptékkal mérve lenne nagy – építése segítene az esz-közpark korszerűsítésén, hanem a közepes berendezések korszerű szintre való emelése; ugyanakkor indokolt esetekben a nemzetközileg elérhető „nagy berendezésekhez” való hozzáférés biztosítása feltétlenül szükséges a hazai kísérleti kultúra fenntartásához.

A nemzetközi kapcsolatok széles körűek és alapvető fontosságúak ma is, és lesznek a jövőben is a fizikai kutatás területén. Jelen munkában csupán arra van lehetőségünk, hogy a kapcsolatok néhány elemét megemlítsük. A kapcsolatok kormányközi Tét-egyezmények keretében, akadémiai együttműködések formájában, intézmények közötti két és többoldalú megállapodások keretében, elnyert pályázatok (pl. EU 5. keretprogram) formájában valósulnak meg. Külön ki kell emelni a nagy berendezésekhez (gyorsítók, neutron és sugárforrások) való rendezett hozzáférés kérdését; a fizikai kutatás több területe (RF, MF, SZTF-FAT) nem nélkülözheti ezeket a lehetőségeket. Példaként a CERN-nel való kapcsolatot kell kiemelni, vagy a NASA-hoz, ESA-hoz fűződő kapcsolat említendő. Intézményeink helyet adnak néhány nemzetközi adatbázisnak (pl. Naprendszer, kis égitestek), illetve szervezetnek és programnak, mint pl. Budapesti Kutató Reaktor (BKR), az MTA Nemzetközi Elméleti Fizikai Műhelye (NEFIM). A legnagyobb probléma, hogy ezek a kapcsolatok legtöbbször nem kiegyensúlyozottak, a külföldi partnernek nincs miért ide utaznia. A magyar fél általában nem tud unikális mérési vagy egyéb lehetőséget nyújtani, ez alól talán a BKR lesz a kivétel. Hiányoznak vagy csak nagyon kis mértékben vannak jelen azok a pályázati lehetőségek, amelyek a nagy berendezések melletti méréseket, illetve más intézetcsoporthoz való közös kutatást segítik elő. Még a volt szocialista blokk többi államához képest is elmaradtunk a nagy nemzetközi létesítményekben való tagság tekintetében.

Munkatársaink aktívan vesznek részt a nemzetközi tudományos közéletben, tisztségviselői vagy tagjai számos tudományos testületnek, bizottságnak (pl. EPS, IUPAP), nagyszámú sikeres nemzetközi konferencia rendezésére került sor hazánkban, számos nemzetközi konferencia szervezőbizottságának, tudományos tanácsadó testületének tagja magyar fizikus, valamint neves folyóiratok szerkesztőbizottságában vesznek részt kutatóink.

Az EU 5. keretprogramjában való részvételünk – új lehetőségeket teremtve – várhatóan új feladatok elé állítja kutatóinkat. A külföldi vendégek fogadását segítettő hasznos lenne, ha az MTA vagy az egyes intézetek vendégházat hoznának létre. Ez nagyban elősegítené a nemzetközi kapcsolatok szélesítését.

A kutatókról

A hazai tudományos kutatásra általában jellemző magas átlagos életkor (ami nem a fizikai kutatásban a legrosszabb!) mellett a fizikát is sújtja a középkorú vezető generáció kellő létszámának a hiánya. Így egyes vezető kutatók nyugalmába vonulása az általuk művelt téma megszűnését vonja maga után. A fiatalok esetében más a helyzet: nem divatos szakma a kutatás, túl sok a befektetés, túl kevés a siker. Ez az értékrend valószínű távol tartja a sikervadász jelölteket, de az ide igyekvő „megszállottaknak” is kell valamiből élni. A kutatás alulfinanszírozott, a nevelésesen alacsony kutatói fizetéseken változtatni kell, egyébként kontraszelekció fog érvényesülni. A PhD-képzés, a fiatal kutatók akadémiai támogatása és a Bolyai-ösztöndíj javított valamit a fiatalok helyzetén.

Javítandó a belső koherencia, azaz az elméleti és kísérleti munkák összhangja, továbbá korrigálni kell az elaprózódást generáló pályázati szisztémát. Nem önmagában a pályázati koncepció a hibás, hanem a nevelésesen alacsony pályázati összegek, és a „kapjon mindenki néhány forintot, hadd tanuljon gazdálkodni” elv, ami a tudományos iskolák szétverését segítette elő.

Mindannyian tudjuk, hogy a kutatói eredményesség és a siker, illetve elismertség nem jelent azonosságot. Minél több objektív feltétele/gátja van a munkának, annál nehezebben érhető el a kitűzött cél, annál valószínűtlenebb a siker. A miénkhez hasonló kis és szegény országok kutatói számára ezért kevésbé vonzó az instrumentális és anyagi feltételektől jobban függő kísérleti munka. Ha az instrumentális háttér (legalább néhány kiválasztott területen) külön nem biztosítjuk, és az elméleti és kísérleti programok pályázati támogatottsága csaknem azonos szintű marad, akkor a hazai kísérleti kutatások háttere és személyi vonzása tovább romlik.

A tudományos teljesítmény értékelésének kanonizált formája, a minősítési rendszer átalakulóban van. Ennek vannak jó és rossz oldalai. A „PhD” csak jogilag azonos – de színvonalában nem – a „tudomány kandidátusa” fokozattal. A kandidátusi szint süllyedése magával vonhatja az „MTA doktora” címnek a „tudomány doktora” fokozathoz képesti színvonalcsökkenését. Ennek a megállítása aktuális feladat. A Széchenyi professzori ösztöndíj és a pótlékok rendszere a tisztességes fizetési szisztéma helyett csak növeli a torzításokat.

Súlyos kérdés, hogy azt műveljük-e, amit kell, vagy elegendő súllyal műveljük-e, amire szükség lesz. Részben valószínű, hogy igen, de az ismeretlenben nem matricás autópályák vezetnek, a járatlan úton viszont a felderítők felszerelés nélkül kudarokra, netán halálra vannak ítélve.

A sikerhez – bármilyen kicsi legyen is – értékrendünk és önértékelésünk pályamódosítására is szükség van. A prométheuszi tűznél a vadászok mellett a tanítóknak, a tűz táplálóinak és a nyársak készítőinek is helyet kell biztosítani. Azt hisszük, hogy a homo sapiens genetikai adottsága a tökéletesebbre való törekvés, és azt reméljük, hogy a tudományt művelők mennyiségi csökkenése a minőség javulásával jár együtt.

A környezetről

Végül azt a kérdést tesszük fel, hogy csökkent-e a társadalmi érdeklődés a fizika tudománya iránt. A kétpólusú hatalmi elrendeződés átmeneti megszűnése kétségtelenül csökkentette a „fegyverkovácsok” iránti igényt, a „társadalom” pedig közömbösen veszi kézbe azokat az eszközöket, amiket a tudomány eredményei alapján kapott. Mégis úgy gondoljuk, hogy a legjobbak tudásvágya, a növekvő energiafogyasztás, a környezetpusztítás tudatosulása, az informatika igényei, az élő anyag szerkezetének felderítése, a biokompatibilis, a környezetbarát és az újrafeldolgozható anyagok, valamint a teljesen új struktúrák (pl. eddig nem ismert szénmódosulatok) stb. felfedezése, továbbá a tudományos kutatás multidiszciplináris és több nézőpontú megközelítése biztos jövőt jósol a fizikai kutatásnak.

Tisztában vagyunk azzal, hogy társadalmi szemléletváltásra is szükség van, és ezért az oktatás és tömegkommunikáció sokat tehet, és kell is, hogy tegyen. Ennek érdekében nagyon lényeges, hogy a fizika (és hasonlóan a tudományművelés többi ága) leplezze le az áltudomány megnyilvánulásait, és ne ártson magának hamis illúzió keltésével. A kérdést azért tartjuk szükségesnek megemlíteni, mert felhívja a figyelmet az előrejelzésekkel/jóslásokkal kapcsolatos óvatosságra, valamint a kapott saját eredmények kritikus értékelésének szükségességére, és főleg a közzététel mérlegelésére. Megteremtendők azok a fórumok, amelyeken keresztül tudatosítani lehet a társadalom minden tagjában, hogy a háztartási gép vagy szórakoztató elektronika csak akkor működik, ha az erőmű (lett legyen akár atomerőmű) villamosenergiát táplál a hálózatba. Hogy azért fekdühetünk az életműködésünket vagy betegségünket felderítő, a testünket egyáltalán nem károsító, mágneses rezonancián vagy pozitronemisszió alapuló diagnosztikai gépekbe, mert fizikusok, anyagtudósok, radartechnikusok, mérnökök, informati-

kusok és orvosok az utóbbi időben megtanultak együtt dolgozni. Ezekben, és a többi hasonló, modern eszközben nagyon sok fizikai eredmény testesül meg, és legalább annyi vár a még tökéletesebb vagy gazdaságosabb megoldásra. Ismere-teink bővítésében, az életminőség javításában a tudománynak és technológiának – ezen belül a fizikának is – meghatározó szerepe volt, van és lesz a következő században. A tudomány története, különösen a 20. századé, azt mutatja, hogy az ún. alapkutatás eredményeit (még a legelvontabbnak látszó elvi kérdéseket is) egy bizonyos idő múlva (ma már elég rövid időn belül) alkalmazzák a techniká-ban vagy más területen, és gazdasági haszonnal járnak, javítják az emberek élet-minőségét. A tudománypolitikának tehát egyik fontos eleme kell legyen az alap-kutatások fokozott mértékű támogatása. Ez különösen érvényes a természet-tudományokra.

*

A nemzetközi irányzatokat is tekintve, az a véleményünk, hogy a hazai fizikai kutatás jó úton halad. Egyes területeken teljesen az élvonalban van, sőt vannak kérdések, amelyekben iránymutató szerepet tölt be. Az itt érintett kutatások lé-nyegében alapkutatás jellegűek, csak kismértékben alkalmazások. Következés-képpen gazdasági haszonnal belátható időn belül nem nagyon kecsegtetnek, de a világról, környezetünkről alkotott képünket nagymértékben befolyásolják, és hosszabb időskálán szemlélve olyan technikai, orvosi, biológiai alkalmazások alapjai lehetnek, amelyek nemcsak kulturális vonatkozásban, hanem gazdasági értelemben is szebbé, könnyebbé tehetik életünket. A tudománypolitikát meg-határozó szervezeteknek ezt kell belátniuk, és ebből eredően a lehetőség szerinti maximális támogatást megadni a tudományos kutatáshoz és annak szellemi for-rását jelentő egyetemi oktatáshoz. Utóbbi fontosságáról külön is érdemes lenne egy tanulmányt összeállítani, mert az alakuló tudománypolitika oktatáspolitiká-nélkül nem lehet hatásos.

STRATÉGIAI KUTATÁSOK A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIÁN MŰHELYFÜZETEK

II. DISZCIPLÍNÁK MŰVELÉSE

Matematika (*Császár Ákos*)

Orvostudomány (*Vizi E. Szilveszter*)

Biológia (*Friedrich Péter*)

Fizika (*Horváth Zalán–Nagy Károly–Tompai Kálmán*)

Kémia (*Görög Sándor*)

Gazdaságtudományok (*Szentes Tamás–Zalai Ernő*)

Nyelvtudomány (*Kiefer Ferenc*)

Állam- és jogtudomány, politológia (*Kulcsár Kálmán*)

Művészetek (*Poszler György*)

Történettudomány (*Glatz Ferenc*)

Filozófia (*Vajda Mihály*)

Agrártudomány (*Dohy János–Heszky László–Tomcsányi Pál*)

Szociológia és demográfia (*Cseh-Szombathy László*)

Földtudomány (*Pantó György–Ádám József–Mészáros Ernő*)

Műszaki tudományok (*Somlyódy László–Bokor József–*

Finta József–Gyulai József–Nyíri András)

Informatika (*Vámos Tibor*)

1996 májusában az MTA javaslatára átfogó tudománypolitikai reform kidolgozása indult meg Magyarországon. A Tudománypolitikai Kollégium május 22-én állást foglalt egy hosszú távú terv és egy cselekvési program kidolgozásáról. A Tudománypolitikai Kollégiumnak az Akadémia elnöke az érintett tárcákkal egyeztetve november 13-án előterjesztette a rövid távú cselekvési programot, amely többek között tartalmazta a magyarországi állami fenntartású kutatóbázis áttekintését és konszolidálását (többek között az akadémiai és a tárcák kezelésében lévő kutatóintézetek áttekintését és későbbi időpontban diszciplínaként, a tanszéki kutatóbázis átvilágítását). Tartalmazta a program a finanszírozási rendszer felülvizsgálatát, s ennek részeként a költségvetési ráfordítás hanyatlásának megállítását. Emellett szólt a program a fiatal kutatók helyzetének megvizsgálásáról, a kutatói és egyetemi bérrendszer reformjáról, tudomány és társadalom viszonyának felülvizsgálatáról és általában a magyar tudomány és kutatásszervezet nemzetközi beágyazottságának elősegítéséről.

1996 decemberében állást foglalt az országgyűlés a tudomány kiemelt költségvetési támogatásáról, és megbízta a Magyar Tudományos Akadémiát azzal, hogy tízéves távlatban, folyamatos munkával vizsgálja felül a magyarországi tudomány helyzetét, és fogalmazzon meg javaslatokat a tennivalókra.

Az MTA közgyűlése 1997 decemberében állást foglalt három tudománypolitikai program megindítása érdekében:

1. Készüljön el egy helyzetértékelés és annak vitája.
2. Kerüljön sor a Magyarországon művelt tudományágak helyzetértékeléseire (diszciplínaviták).
3. Készüljön el a magyarországi kutatóbázis katasztere.

1998 tavaszára elkészült a helyzetértékelés és a piacgazdaság viszonyai között mozgó tudománypolitika alapelveinek tisztázó vitairata. (*Tudománypolitika az ezredforduló Magyarorszáján*. Budapest, 1998.) És megindultak a tudománypolitika kérdéseiről a viták (ezek eredményeiként 2002-ben jelenik meg a *Tudománypolitika és kutatásszervezet Magyarországon* című kötet). 2000-ben pedig elkészült a magyarországi kutatóbázis katasztere (*Magyarországi kutatóhelyek*. Budapest, 2001).

1999-ben és 2000-ben lefolytatták a diszciplínavitákat. E viták eredményeként készültek el az elmúlt esztendőben az egyes diszciplínákat értékelő tanulmányok, amelyeket a jelen füzet sorozatban adunk közre.

Glatz Ferenc